

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

EMERSON GERSTEMBERGER

**CARACTERIZAÇÃO DAS RELAÇÕES HÍDRICAS E AJUSTE DE MODELOS DE
PRODUÇÃO ÁGUA-CULTURA PARA CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum* spp.) NA
REGIÃO DE PARANAVAÍ-PR**

CURITIBA

2012

EMERSON GERSTEMBERGER

**CARACTERIZAÇÃO DAS RELAÇÕES HÍDRICAS E AJUSTE DE MODELOS DE
PRODUÇÃO ÁGUA-CULTURA PARA CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum spp.*) NA
REGIÃO DE PARANAVAÍ-PR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Solo e Ambiente, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza.

Co-orientador: Prof. Dr. Robson André Armindo

CURITIBA

2012

G383 Gerstemberger, Emerson.

Caracterização das relações hídricas de modelos de produção
água-cultura para cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) na região de
Paranavaí-PR. / Emerson Gerstemberger. – Curitiba : 2015.
xi, 102 f. il.

Orientador: Jorge Luiz Moretti de Souza.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná.
Setor de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo.

1. Cana-de-açúcar – condições hídricas. 2. Cana-de-açúcar –
balanço hidrológico. I. Souza, Jorge Luiz Moretti de. II. Universidade
Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias. Programa de Pós-
Graduação em Ciência do Solo. III. Título.

CDU 633.61



PARECER

Os Membros da Comissão Examinadora, designados pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pelo candidato **EMERSON GERSTEMBERGER**, sob o título: "**Caracterização das relações hídricas e ajuste de modelos de produção água-cultura para cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) na região de Paranavaí-PR**", requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência do Solo – Área de Concentração: Solo e Ambiente, do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após haverem analisado o referido trabalho e arguido o candidato, são de Parecer pela "**APROVAÇÃO**" da Dissertação, completando assim, os requisitos necessários para receber o diploma de **Mestre em Ciência do Solo - Área de Concentração: "Solo e Ambiente"**.

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em Curitiba, 22 de maio de 2012.


Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza, Presidente


Prof. Dr. Ricardo Augusto de Oliveira, Iº. Examinador


Profª. Drª. Karina Maria Vieira Cavaliere, IIª. Examinadora


Prof. Dr. Robson André Armindo, IIIº. Examinador

DEDICATÓRIA

A meus amigos, minha família pelo apoio e força, e a todos aqueles que me ajudaram direta e indiretamente nessa longa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me dar a vida e me acompanhar em todos os momentos.

Aos meus pais Erwin e Ivone, que não mediram esforços e afeto, para a formação de seus três filhos;

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade dada e pela preocupação em oferecer um ensino de qualidade;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza, pela amizade, pelos conselhos; pela paciência e por tudo que cresci;

Ao Prof. Dr. Ricardo Augusto de Oliveira pelo fornecimento de muitos dos dados utilizados e pelas orientações e incentivos a mim desprendidos;

Aos meus amigos do Instituto de Terras do Estado de São Paulo (ITESP), pela compreensão nos momentos de ausência e pelo apoio dado;

Agradeço ao Instituto Meteorológico do Paraná (SIMEPAR), pelos dados prontamente disponibilizados, sem os quais seria impossível a realização do presente trabalho;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa no início do programa o que me possibilitou a entrada no meio científico;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pelos ensinamentos e amizade;

Aos funcionários do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, por toda ajuda e companheirismo;

Aos meus amigos e familiares, que sempre me apoiaram e deram força para enfrentar essa e outras caminhadas.

Em especial a minha esposa Caciana, pelas horas de viagem, momentos de dificuldade superados e principalmente por seu apoio e compreensão.

A todos que de alguma forma contribuíram para conclusão desse trabalho.

Meu muitíssimo obrigado!

O objetivo fundamental dos sonhos não é o
sucesso, mas nos livrar do fantasma do
conformismo.

Cury, 2009

SUMÁRIO

	Página
1 - CAPÍTULO 1 – CARACTERIZAÇÃO DAS RELAÇÕES HÍDRICAS E AJUSTE DE MODELOS DE PRODUÇÃO ÁGUA-CULTURA PARA CANA-DE-AÇÚCAR (<i>Saccharum</i> spp.) NA REGIÃO DE PARANAVAÍ-PR	1
1.1 - INTRODUÇÃO GERAL	3
1.2 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	5
2 - CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO DAS RELAÇÕES HÍDRICAS PARA A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR (<i>Saccharum</i> spp.) EM PARANAVAÍ-PR	7
2.1 - INTRODUÇÃO	9
2.2 - MATERIAL E MÉTODOS	11
2.2.1 - Caracterização do local	11
2.2.2 - Fenologia da Cana-de-açúcar	11
2.2.3 - Caracterização agroclimática	12
2.2.4 - Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA)	13
2.2.5 - Estimativa do balanço hídrico do local	13
2.2.6 - Dados climáticos utilizados	13
2.2.7 - Precipitação (<i>P</i>) e evapotranspiração de referência (<i>ET_o</i>)	14
2.2.8 - Atributos físico-hídricos do solo	15
2.2.9 - Armazenamento da água no solo (<i>Arm</i>)	16
2.2.10 - Cálculo da evapotranspiração da cultura (<i>ET_c</i>)	16
2.2.11 - Distribuições de frequência e probabilidade das componentes do balanço hídrico .	16
2.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
2.3.1 - Caracterização climática de Paranavaí-PR	18
2.3.2 - Caracterização dos atributos físico-hídricos do solo	19
2.3.3 - Análise do balanço hídrico	20
2.3.4 - Distribuição de frequência das componentes decendiais do balanço hídrico	25
2.3.5 - Parâmetros estatísticos e probabilidade das componentes do balanço hídrico	26
2.3.6 - Tendência do Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA)	29
2.3.7 - Estimativa da demanda de irrigação complementar	33
2.4 - CONCLUSÃO	35
2.5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36
3 - CAPÍTULO 3 – AJUSTE DE MODELOS DE PRODUÇÃO ÁGUA-CULTURA PARA CANA-DE-AÇÚCAR (<i>Saccharum</i> spp.) EM PARANAVAÍ-PR	40
3.1 - INTRODUÇÃO	42
3.2 - MATERIAL E MÉTODOS	44

	Página
3.2.1 - Caracterização do local	44
3.2.2 - Modelos utilizados para estimar a produtividade	45
3.2.3 - Fenologia da Cana-de-açúcar	46
3.2.4 - Parâmetros de entrada nos modelos água-cultura	47
3.2.5 - Produtividade potencial (Y_p)	47
3.2.6 - Balanço hídrico local para estimativa da ET_c e ER	47
3.2.7 - Precipitação pluvial (P) e evapotranspiração de referência (ET_o)	48
3.2.8 - Atributos físico-hídricos do solo	49
3.2.9 - Armazenamento da água no solo (Arm)	50
3.2.10 - Cálculo da evapotranspiração da cultura (ET_c)	50
3.2.11 - Avaliação da estimativa das produtividades com os modelos água-cultura	51
3.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
3.3.1 - Produtividade real da cana-soca em Paranavaí-PR	52
3.3.2 - Parâmetros físico-hídricos do solo da Estação Experimental de Paranavaí-PR	52
3.3.3 - Componentes do balanço hídrico para cana-soca em Paranavaí-PR	53
3.3.4 - Estimativa da produtividade da cana-soca em Paranavaí-PR	55
3.3.5 - Análise da sensibilidade de modelos.....	59
3.4 - CONCLUSÃO	62
3.5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
Apêndice 1	69
Apêndice 2	74
Apêndice 3	79
Apêndice 4	84
Apêndice 5	89
Apêndice 6	93
Apêndice 7	97
Apêndice 8	98

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

	Página
Figura 2.1 - Valores médios mensais de evapotranspiração da cultura (ET_c) e precipitação (P) para Paranavaí-PR, no período de 1997 a 2009.....	18
Figura 2.2 - Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração real (ER) para o cultivo da cana-planta, na safra 1998/1999, em Paranavaí-PR.....	21
Figura 2.3 - Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ER) para o cultivo da cana-soca, na safra 1998/1999, em Paranavaí-PR.....	21
Figura 2.4 - Deficiência hídrica (Def) e excedente hídrico (Exc) para o cultivo da cana-planta, na safra 1998/1999, em Paranavaí-PR.....	22
Figura 2.5 - Deficiência hídrica (Def) e excedente hídrico (Exc) para o cultivo da cana-soca, na safra 1998/1999, em Paranavaí-PR.....	22
Figura 2.6 - Distribuição de frequência dos valores decendiais de deficiência (Def), para cana-planta e cana-soca, nas safras 1997/98 a 2008/09, em Paranavaí-PR.....	26
Figura 2.7 - Índice de Satisfação das Necessidades de Água ($ISNA$), considerando as fases de desenvolvimento da cultura da cana de açúcar, ciclo cana-planta, nas safras 1997/98 a 2008/09, em Paranavaí-PR.....	30
Figura 2.8 - Índice de Satisfação das Necessidades de Água ($ISNA$), considerando as fases de desenvolvimento da cultura da cana de açúcar, ciclo cana-soca, nas safras 1997/98 a 2008/09, em Paranavaí-PR.....	30
Figura 2.9 - Distribuição de frequência decendial dos Índices de Satisfação das Necessidades de Água ($ISNA$), para cultura da cana-planta e cana-soca, nas safras 1997/98 a 2008/09, em Paranavaí-PR.....	32
Figura 3.1 - Localização da Estação Experimental da Universidade Federal do Paraná, Paranavaí - Paraná, Brasil.....	44
Figura 3.2 - Produtividade média da cana-de-açúcar, ciclo cana-soca, obtidas nas safras 1996/97 a 2007/2008, na Estação Experimental da Universidade Federal do Paraná, Paranavaí-PR e produtividade média regional.....	52
Figura 3.3 - Produtividade real e estimada da cana de açúcar, ciclo cana-soca, obtidas nas safras 1997/98 a 2007/2008, na Estação Experimental da Universidade Federal do Paraná, Paranavaí-PR.....	58
Figura 3.4 - Análise de sensibilidade do modelo de Jensen (1968), utilizando coeficientes ajustados estatisticamente, indicando a redução da produtividade em função da variação da relação ER/ET_c , nas fases de desenvolvimento I, II e III: considerando a condição ótima da relação $ER_i/ET_{ci} = 1$ para duas das i -ésimas fases de desenvolvimento e variando a relação ER/ET_c (0 a 1) para apenas uma das fases de desenvolvimento (I, II ou III)	60
Figura 3.5 - Análise de sensibilidade do modelo de Jensen (1968), utilizando coeficientes ajustados estatisticamente, tendo a produtividade em função da variação da relação ER/ET_c , nas fases de desenvolvimento I, II e III: considerando a condição ótima da relação $ER_i/ET_{ci} = 0,6$ ($ISNA$ satisfatório) para duas das i -ésimas fases de desenvolvimento e variando a relação ER/ET_c (0 a 1) para apenas uma fase de desenvolvimento (I, II ou III)	61

Figura 3.6 - Análise de sensibilidade do modelo de Jensen (1968), utilizando coeficientes ajustados estatisticamente, tendo a redução da produtividade em função da variação da relação ER/ET_c , nas fases de desenvolvimento I, II e III: considerando a condição ótima da relação $ER_i/ET_{ci} = 1,0$ e variando a relação ER/ET_c (0 a 1) para duas ou três a fases de desenvolvimento simultaneamente (I e II; I e III; II e III; I, II e III).....

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 2.1 - Profundidade efetiva do sistema radicular da cultura da cana-de-açúcar (z), duração das fases de desenvolvimento (cana-planta e cana-soca) e respectivos coeficientes de cultivo (kc) utilizados nas análises	12
Tabela 2.2 - Parâmetros de classificação de risco, conforme EMBRAPA (2009)	12
Tabela 2.3 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação da textura e massa específica do solo, encontrados na Estação Experimental de Paranaíba-PR, nas profundidades avaliadas.....	19
Tabela 2.4 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação da umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), e capacidade de água disponível no solo (CAD), dos pontos amostrados na Estação Experimental de Paranaíba-PR, em diferentes profundidades.....	20
Tabela 2.5 - Componentes do balanço hídrico (ET_o , ET_c , ER , P , Def e Exc), realizado para as safras 1997/1998 e 2008/2009 de cana-planta, em Paranaíba-PR	23
Tabela 2.6 - Componentes do balanço hídrico (ET_o , ET_c , ER , P , Def e Exc), realizado para as safras 1997/1998 e 2008/2009 de cana-soca, em Paranaíba-PR	23
Tabela 2.7 - Média das componentes do balanço hídrico (ET_o , ET_c , ER , P , Def e Exc), nas diferentes fases de desenvolvimento da cana-planta e cana-soca, realizado para as safras 1997/1998 e 2008/2009, em Paranaíba-PR	24
Tabela 2.8 - Lâmina de irrigação estimada no balanço hídrico, considerando as fases de desenvolvimento da cultura da cana-soca e cana-planta, nas safras 1997/98 à 2008/09, em Paranaíba-PR	33
Tabela 2.9 - Número de irrigações estimadas no balanço hídrico, considerando as fases de desenvolvimento da cultura da cana-soca e cana-planta, nas safras 1997/98 à 2008/09, em Paranaíba-PR	34
Tabela 3.1 - Produtividade média da cana-de-açúcar, em primeira soca, obtidas nas safras 1997/98 a 2007/2008, na Estação Experimental da Universidade Federal do Paraná, Paranaíba-PR	45
Tabela 3.2 - Fases de desenvolvimento, profundidade efetiva do sistema radicular (z) e coeficientes de cultivo (kc) da cultura da cana-de-açúcar, ciclo cana-soca	47
Tabela 3.3 - Coeficientes e/ou fatores levantados na literatura empregados na simulação dos modelos água-cultura.....	51
Tabela 3.4 - Textura (areia, silte e argila), massa específica do solo e umidades da capacidade de campo e ponto de murcha permanente da Estação Experimental da Universidade Federal do Paraná, Paranaíba-PR, em diferentes profundidades	53
Tabela 3.5 - Ciclo, profundidade efetiva do sistema radicular (z) e capacidade de água disponível (CAD) do solo da Estação Experimental de Paranaíba-PR, para a cultura da cana-de-açúcar (cana-soca), nas fases de desenvolvimento I, II e III	53
Tabela 3.6 - Componentes hídricas do balanço hídrico (ET_o , ET_c , ER , P , Def e Exc), nas safras 1998/99 a 2008/09, para a cultura da cana-de-açúcar, ciclo cana-soca, na Estação Experimental da Universidade Federal do Paraná, Paranaíba-PR	54

	Página
Tabela 3.7 - Componentes médios (safras 1998/99 a 2008/09) do balanço hídrico (<i>ETo</i> , <i>ETc</i> , <i>ER</i> , <i>P</i> , <i>Def</i> e <i>Exc</i>), nas diferentes fases de desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, ciclo cana-soca, na Estação Experimental da Universidade Federal do Paraná, Paranavaí-PR	54
Tabela 3.8 - Coeficiente de determinação (R^2) obtido nas análises de regressão entre componentes do balanço hídrico e Produtividade, empregando funções simplificadas.....	55
Tabela 3.9 - Coeficientes e/ou fatores (k_y , k_{y_i} e λ) dos modelos água-cultura, recomendados na literatura e ajustados estatisticamente no presente trabalho para a cana-de-açúcar, ciclo cana-soca, em Paranavaí-PR	56
Tabela 3.10 - Coeficientes de determinação (R^2) e índice “ d ” obtidos nas análises comparando a produtividade real e estimada com os modelos água-cultura, para cana-de-açúcar, ciclo cana-soca, em Paranavaí-PR.....	57
Tabela 3.11 Índice de desempenho de Camargo & Sentelhas (1997), obtidos nas análises contrastando produtividade real e estimada com os modelos água-cultura, para cana-de-açúcar, ciclo cana-soca, em Paranavaí-PR	57

CAPÍTULO 1 – CARACTERIZAÇÃO DAS RELAÇÕES HÍDRICAS E AJUSTE DE MODELOS DE PRODUÇÃO ÁGUA-CULTURA PARA CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum* spp.) NA REGIÃO DE PARANAVAÍ-PR

Autor: Eng. Agr. Emerson Gerstemberger

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza

RESUMO: A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) sendo um cultivo semi-perene, sofre influências climáticas ao longo dos ciclos, afetando diretamente a produtividade das safras. A máxima produção da cultura depende da interação entre os fatores ligados à dinâmica do sistema solo, planta e atmosfera. O conhecimento das condições climáticas é fundamental para efetuar o planejamento da lavoura e previsão de safras. O presente estudo teve como objetivo caracterizar as relações hídricas e avaliar o desempenho de modelos de produção água-cultura para cana-de-açúcar no município de Paranavaí-PR. As componentes hídricas, necessárias à caracterização agroclimática da cultura e modelos de produção água-cultura, foram determinadas em balanço hídrico diário, baseando-se na metodologia de Thornthwaite & Mather. Nas avaliações foram considerados os critérios de necessidade térmica e hídrica estabelecidos no Zoneamento Agroecológico da Cana-de-açúcar. Nas safras analisadas (1997/98 a 2008/09), verificou-se deficiência e excedente hídrico concentrando-se, principalmente, na fase de desenvolvimento II. Paranavaí-PR apresentou baixo risco agroclimático e classificação “Indicada” (B), tendo como ressalva a irrigação de salvamento na fase de desenvolvimento II (desenvolvimento) para os ciclos de cana-planta e cana-soca. As análises envolvendo funções simplificadas obtiveram baixos coeficientes de determinação ($R^2 < 0,39$), não demonstrando boa relação entre produtividade real com parâmetros climáticos. O ajuste dos coeficientes dos seis modelos água-cultura testados retornaram valores satisfatórios, possibilitando que os modelos de Stewart proposto por Doorenbos & Kassan e Jensen atingissem classificação estatística máxima (“ótimo”), sendo possível a utilização dos mesmos para estimar a produtividade da cana-soca, em Paranavaí-PR.

Palavras-chave: Balanço hídrico, modelagem, deficiência hídrica, produtividade.

CHAPTER 1 - CHARACTERIZATION OF WATER RELATIONS AND ADJUSTMENT OF WATER-CULTURE PRODUCTION MODELS FOR SUGAR CANE (*Saccharum* spp.) IN PARANAVAÍ-PR

Author: Eng. Agr. Emerson Gerstemberger

Advisor: Teach. Doc. Jorge Luiz Moretti de Souza

ABSTRACT: The sugarcane (*Saccharum* spp), being a semi-perennial crop, is influenced by climatic conditions, directly affecting the crop yield. The maximum crop yield depends on the interaction among the factors linked to the soil, plant and atmosphere dynamics. Knowledge of climatic conditions is essential for crop planning and crop forecasting. The present study aimed to characterize the water relations of sugarcane for the municipality of Paranavaí-PR and evaluate the performance of water-culture models estimating the productivity of sugarcane using climatic parameters. The water components, necessary for agroclimatic characterization of water-culture models were calculated on a daily water balance, based on the method of Thornthwaite & Mather. In the evaluations were considered necessary criteria established in the Agroecological Zoning of Sugarcane. For crop years analyzed (1997/98 to 2008/09), observed deficiency and water surplus, mainly focusing on fase II. Paranavaí-PR showed low risk and agroclimatic classification "Indicated" (B), with the exception of irrigation rescue at fase II (developing) for the cycles of plant cane and first ratoon cane. The analyzes involve simplified functions obtained low coefficients of determination ($R^2 < 0.39$), showing relationship between real productivity with climatic parameters not good. The adjustment coefficients of the six water-culture models tested returned satisfactory values, allowing the model of Stewart proposed by Doorenbos & Kassan and Jensen reached maximum statistical classification ("great"), with the possible use of them to estimate the productivity of first ratoon cane in Paranavaí PR.

Key-words: Water balance, Modeling, Water stress, Productivity.

1.1 INTRODUÇÃO GERAL

A cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) tem grande importância para o Brasil, sendo uma das principais culturas agrícolas do país, servindo como matéria-prima para a produção de açúcar e álcool. O Brasil é líder na produção canavieira no mundo, seguido da Índia, China e Tailândia. Na safra de 2010/2011, o país possuiu uma área estimada em 8.167,5 milhões de hectares, com produção de 651.514,3 milhões de toneladas. O estado do Paraná contribuiu com cerca de 10% da receita setorial sucroalcooleira do Brasil, nos últimos cinco anos (SEAB, 2010).

Estimulado pelo aumento da demanda interna por etanol, devido à popularização dos veículos bicombustíveis e pelo Protocolo de Quioto, a partir de 2003 o setor sucroalcooleiro nacional iniciou a sua quarta fase de expansão (Abdala et al., 2011). O Estado do Paraná vem se fortalecendo como pólo sucroalcooleiro, ampliando a área plantada de cana-de-açúcar, tornando-se o segundo maior produtor de cana-de-açúcar do Brasil (Tschá et al., 2010).

Devido às restrições naturais, o Estado do Paraná apresenta concentração geográfica das áreas aptas ao cultivo de cana-de-açúcar, que se concentram predominantemente nas mesorregiões Norte Pioneiro, Norte Central e Noroeste, responsáveis por quase 100% da produção paranaense de cana-de-açúcar (Libardi & Cardoso, 2007).

O Estado do Paraná, embora com saldo positivo no balanço hídrico anual para a maioria das regiões (IAPAR, 1978), apresenta grande variação na distribuição temporal e espacial das precipitações (Caramori et al., 1991), sendo este o fator em grande parte responsável pelas quebras de safras. Assim, o conhecimento da variação das fases de desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar perante as condições climáticas é fundamental para que se possa estudar, entender, modelar e quantificar parâmetros de desenvolvimento e produção da cultura, nas diferentes fases de seu desenvolvimento (Teruel et al., 1997).

Maule et al. (2001) consideram que a disponibilidade de água no solo rege a produção vegetal, sendo que a falta ou excesso compromete o desenvolvimento da área foliar da cana-de-açúcar. Smit & Singels (2006) descrevem que a tolerância da cana-de-açúcar quanto ao estresse hídrico ainda é um aspecto pouco explorado. Para Marin (2008), a produção de cana-de-açúcar apresenta, em algumas situações, estreita correlação com a precipitação pluviométrica e deficiência hídrica. Bezuidenhout & Singels (2007) constataram na cadeia produtiva Sul Africana do açúcar que a disponibilidade hídrica regula acentuadamente a

variabilidade da produção da cana-de-açúcar na região. Os autores observaram que a previsão hidrológica é essencial para prever quebra de safras.

Inman-Bamber (2004) evidenciou que a ocorrência de estresse hídrico no decorrer do desenvolvimento da cana-de-açúcar promoveu restrição dos processos fisiológicos, como a divisão celular e alongação, levando a diminuição da taxa de acúmulo de massa seca e índice de área foliar.

A quantificação da intensidade e levantamento do período de ocorrência das deficiências hídricas no solo são informações importantes na definição de locais e períodos aptos aos cultivos (Wrege, 1999). Dessa forma, a realização de um balanço hídrico empregando metodologia simplificada e de baixo custo, pode permitir, a partir de equações de estimativa do armazenamento da água no solo, a identificação e quantificação da ocorrência de estresse hídrico no decorrer do desenvolvimento da cana-de-açúcar, bem como a estimativa de valores adequados ao planejamento de atividades agrícolas.

Estimativas de produtividade envolvendo culturas agrícolas podem ter êxito a partir de modelos de simulação, pois expressam a relação entre a resposta fisiológica das plantas às condições ambientais que ocorreram durante o ciclo e o desenvolvimento da cultura (Andrade Júnior, 2006).

No presente estudo, teve-se como objetivo caracterizar as relações hídricas para cana-de-açúcar no município de Paranavaí-PR e avaliar o desempenho de modelos de produção água-cultura que melhor relacionem os parâmetros climáticos locais com a produtividade da cultura.

1.2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDALA, K. D. & RIBEIRO, F. L. Análise dos impactos da competição pelo uso do solo no Estado de Goiás durante o período 2000 a 2009 provenientes da expansão do complexo sucroalcooleiro. *Revista Brasileira de Economia (RBE)*, v. 65, n. 4, p. 373-400, 2011.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S.; FIGUEREDO JÚNIOR, L. G.; CARDOSO, M. J. & RIBEIRO, V. Q. Parametrização de modelos agrometeorológicos para estimativa de produtividade da cultura do milho na região de Parnaíba. *Revista Ciência Agronômica*, v. 37, n. 2, p. 130-134, 2006.
- BEZUIDENHOUT, C. N. & SINGELS, A. Operational forecasting of South African sugarcane production : Part 1 – System description. *Agricultural Systems*, v. 92, p. 23-38, 2007.
- CARAMORI, P.H.; OLIVEIRA, D. & FARIA, R.T. Frequência de ocorrência de períodos com deficiência hídrica (veranicos) no Estado do Paraná. Londrina: IAPAR, 1991, 40 p. (Boletim técnico, n. 36).
- INMAN-BAMBER, N. G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. *Field Crops Research*. v. 89, p. 107-122, 2004.
- INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ - IAPAR. Cartas Climáticas Básicas do Estado do Paraná, Londrina: IAPAR, 1978, 41 p.
- LIBARDI, D. & CARDOSO, N. A. Cana-de-açúcar: a salvação da lavoura ou do planeta? Análise conjuntural - IPARDES, v. 29, n. 05-06, p. 24-26, 2007.
- MARIN, F.R.; LOPES-ASSAD, M.L.; ASSAD, E.D.; VIAN, C.E. & SANTOS, M.C. Sugarcane crop efficiency in two growing seasons in São Paulo State, Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 43, p. 1449-1455, 2008.
- MAULE, R. F.; MAZZA, J. A. & MARTHA JR., G. B. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. *Scientia Agricola*, v. 58, n. 2, p. 295-301, 2001.
- SECRETARIA DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO DO PARANÁ - SEAB. Estimativa de safra. Disponível em: <www.seab.pr.gov.br> Acesso em: 22/04/2010.

- SMIT, M. A. & SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. *Field Crops Research*, v. 98, p. 91-97, 2006.
- TERUEL, D. A.; BARBIERI, V. & FERRARO JR., L. A. Sugarcane leaf area index modeling under different soil water conditions. *Scientia Agricola*, v. 54, n. (Número especial), p. 39-44, 1997.
- TSCHÁ, O. D.; TOMASETTO, M. Z.; SHIKIDA, P. F.; ALVES, L. R. & BUENO, R. Encadeamento produtivo, localização e associação geográfica da agroindústria canavieira no Paraná. *Revista Redes*, v. 15, n. 1, p. 128-155, 2010.
- WREGGE, M. S. Risco de deficiência hídrica na cultura do milho no estado do Paraná. *Pesquisa Agropecuária brasileira*, v. 34, n.7, p. 1119-1124, 1999.

CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO DAS RELAÇÕES HÍDRICAS PARA A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum spp.*) EM PARANAVAÍ-PR.

Autor: Eng. Agr. Emerson Gerstemberger

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza

RESUMO: A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), por ser uma cultura semi-perene, está sujeita as influências climáticas que ocorrem ao longo do ciclo, afetando diretamente seu comportamento. A máxima produção da cana-de-açúcar depende da interação entre fatores ligados à dinâmica do sistema solo, planta e atmosfera sendo o conhecimento das condições climáticas fundamental para efetuar o planejamento da lavoura. O presente estudo teve como objetivo caracterizar as relações hídricas da cana-de-açúcar, para o município de Paranavaí-PR, buscando identificar períodos de restrição ao desenvolvimento da cultura. A evapotranspiração de referência (ETo) foi estimada com o método de Penman-Monteith, parametrizado pela FAO. A radiação solar incidente e os valores de capacidade de água disponível (CAD) utilizados no balanço hídrico foram obtidos de acordo com metodologia proposta pela EMBRAPA. As componentes hídricas necessárias à caracterização agroclimática da cultura foram calculadas e estimadas a partir de um balanço hídrico diário, baseando-se na metodologia de Thornthwaite & Mather. Nas avaliações foram considerados os critérios de necessidade térmica e hídrica da cana-de-açúcar, estabelecidos no zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar no Estado do Paraná. Entre 1997 e 2009, Paranavaí-PR demonstrou deficiência hídrica média de 305,9 mm safra⁻¹ para a cana-planta e 299,9 mm safra⁻¹ para cana-soca. A deficiência e o excedente hídrico concentraram-se principalmente na fase de desenvolvimento II. O Índice de Satisfação das Necessidades de Água ($ISNA$) médio foi de 0,80 para cana-planta e 0,76 para cana-soca. O local possui baixo risco agroclimático apresentando classificação “Indicada” (B), tendo como ressalva a irrigação de salvamento na fase de desenvolvimento II (desenvolvimento) para os ciclos de cana-planta e cana-soca.

Palavras-chave: Relações hídricas, deficiência hídrica, $ISNA$, simulação, clima.

CHAPTER 2 - CHARACTERIZATION OF WATER RELATIONS FOR SUGARCANE (*Saccharum spp.*) IN PARANAVAÍ – PR.

Author: Eng. Agr. Emerson Gerstemberger

Advisor: Teach. Doc. Jorge Luiz Moretti de Souza

ABSTRACT: The sugarcane (*Saccharum spp*) for being a semi-perennial crop is subject to climatic influences that occur throughout the cycle, which directly affects their behavior. The maximum production of sugarcane depends on the interaction among factors related to the soil, plant and atmosphere dynamics, and knowledge of the climatic conditions is essential to make the crop planning. The present study aimed to characterize the water relationships of sugarcane, for Paranavaí-PR city, to identify periods of restriction to the crop development. The reference evapotranspiration was estimated by the Penman-Monteith method, parameterized by FAO. The incident solar radiation and the values of available water capacity (AWC) used in water balance were obtained according to the methodology proposed by EMBRAPA. The water components necessary for agroclimatic characterization of crop were calculated and estimated from a daily water balance, based on the Thornthwaite & Mather method. In the evaluation, was considered the criteria of necessity termic and hidric established in Agroecological Zoning of Sugarcane. Among 1997 and 2009, Paranavaí - PR indiested means values of water deficit of 305.9 mm safra⁻¹, for the cane plant, and 299.88 mm safra⁻¹ for first ratoon cane. Deficiency and water surplus focused primarily on fase II. The Satisfaction Index Water Needs (ISNA) mean 0.80 for plant cane and 0.76 to first ratoon cane. The site showed low risk presenting agroclimatic classification "Indicated" (B), with the exception of irrigation rescue at fase II (developing) for the cycles of plant cane and first ratoon cane.

Key-words: Water relations, drought stress, *ISNA*, simulation, climate.

2.1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) é um dos principais produtos do agronegócio brasileiro e a área plantada no Estado do Paraná, principalmente na região de Paranavaí, está em plena expansão. No Estado do Paraná, a cana-de-açúcar ocupa área de 607 mil hectares, com produção anual de 50 milhões de toneladas. A região de Paranavaí, com produção na safra 2010/2011 de 10.022.630 ton, em uma área de 130.000 ha, é responsável por 21% da produção paranaense (SEAB, 2012).

Sendo um cultivo semi-perene e amplamente cultivado, a cultura da cana-de-açúcar é submetida a diferentes condições ambientais e de manejo, ocasionando variações ao longo dos ciclos (Silva, 2008). O crescimento da planta e os rendimentos quantitativos e qualitativos estão ligados a muitos elementos ambientais. A temperatura e a precipitação, por seus efeitos diretos, são os fatores que apresentam melhor relação com o desenvolvimento das culturas (Ramirez et al., 2004). A água é considerada fator limitante à produção da cana-de-açúcar, posto que a máxima expressão do potencial produtivo da cultura, somente é possível quando há disponibilidade hídrica adequada (Inman-Bamber & Smith 2005). O estresse hídrico afeta a taxa de absorção de água, acúmulo de biomassa, crescimento estrutural da planta e altera a assimilação e acúmulo de sacarose (Singels et al., 2010).

O dano promovido pelo estresse hídrico depende da fase de desenvolvimento em que a planta se encontra e da duração do estresse. Quanto maior o período com baixa disponibilidade hídrica, maiores serão os danos sobre a produtividade de colmos e sacarose (Inman-Bamber, 2004; Farias et al., 2008). A sistematização dos dados climáticos, considerando as fases de desenvolvimento dos cultivos, contribui para melhorar o planejamento dos recursos, a produtividade e a sustentabilidade ambiental (Garcia et al., 2007; Araya et al., 2010). Entretanto, o efeito do estresse hídrico sobre a cana-de-açúcar nas diferentes fases de seu desenvolvimento não se encontra bem definido na literatura, prejudicando estimativas de como as colheitas serão afetadas, quando a umidade do solo se encontra acima ou abaixo de valores ótimos (Wiedenfeld, 2000).

No manejo da cana-de-açúcar é necessário prever o comportamento da cultura em produção frente às alterações climáticas, promovendo o uso eficiente da água da chuva e minimizando os períodos restritivos ao desenvolvimento da lavoura (Silva & Bergamasco, 2001; Carranza et al., 2011). O conhecimento detalhado da dinâmica da água no solo durante o desenvolvimento da cultura, fornece elementos essenciais ao estabelecimento ou

aprimoramento de práticas de manejo agrícola que visem otimizar a produtividade. Por meio do balanço hídrico, é possível estudar detalhadamente as condições hídricas em que a cultura se desenvolveu, permitindo a verificação de todas as entradas e saídas de água no solo, conforme as peculiaridades da espécie, resultando no saldo de água no solo no período (Cruz et al., 2005; Brito et al., 2009). A partir de informações obtidas em balanços hídricos, a caracterização agroclimática proporciona um inventário conciso do potencial agroclimático e restrições ao desenvolvimento da planta, auxiliando na formulação de políticas e adequação da cultura para contornar as limitações existentes, bem como estabelecer estratégias de desenvolvimento a curto e longo prazo (Araya et al., 2010).

No presente trabalho, teve-se como objetivo caracterizar as relações hídricas da cana-de-açúcar para o município de Paranavaí-PR, buscando identificar períodos de restrição ao desenvolvimento da cultura.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Caracterização do local

O presente trabalho foi realizado na Estação Experimental de Paranavaí, pertencente ao Setor de Ciências Agrárias (SCA), da Universidade Federal do Paraná (UFPR), situada no Município de Paranavaí-PR, região noroeste do Estado do Paraná, nas coordenadas 22°58'44" de latitude Sul e 52°27'51" de longitude Oeste, com altitude média de 480 m.

A Estação Experimental de Paranavaí está localizada no Terceiro Planalto Paranaense e, segundo a classificação de Köppen, apresenta clima tipo Cfa, subtropical, com temperatura média no mês mais frio inferior a 18°C (mesotérmico) e temperatura média no mês mais quente acima de 22°C, com verões quentes, geadas pouco frequentes e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, sem estação seca definida e precipitação média anual entre 1.300 e 1.400 mm (IAPAR, 1994).

O solo da Estação Experimental é um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, com incidência em mais de 50% dos solos na região (Silva et al., 2005). São solos muito profundos, formados a partir de materiais derivados de arenitos, com sequência de horizontes A, B, C pouco diferenciados. Possuem coloração vermelha escura, sendo porosos, muito friáveis e fortemente drenados. Possuem baixa fertilidade natural, são ácidos, mas de baixo a médio teor de alumínio trocável e saturação de bases baixa (EMBRAPA, 1999).

2.2.2 Fenologia da Cana-de-açúcar

A cultivar de cana-de-açúcar considerada no presente estudo foi a RB72454. Seu ciclo de desenvolvimento em Paranavaí-PR, para os anos estudados, foi de 16 meses para cana-planta, com plantio em abril e colheita em julho do ano seguinte, e de 12 meses para cana-soca, com plantio (rebrotas) em julho e corte em julho do ano seguinte.

Os valores dos coeficientes de cultivo (kc) utilizados para transformar a evapotranspiração de referência (ET_o) em evapotranspiração da cultura (ET_c) são os apresentados por Allen et al. (2006), cujos períodos foram adaptados as fases de desenvolvimento propostas por Machado et al., (1982), Sinclair et al., (2004), Silva et al., (2005) (Tabela 2.1). A profundidade efetiva do sistema radicular (z) foi considerada conforme recomendações de Smith et al., (2005), Ido et al., (2006) e Buso et al., (2009).

Tabela 2.1. Profundidade efetiva do sistema radicular da cultura da cana-de-açúcar (z), duração das fases de desenvolvimento (cana-planta e cana-soca) e respectivos coeficientes de cultivo (kc) utilizados nas análises.

Fase de desenvolvimento*	Início da Fase	Fim da Fase	Duração (dias)	kc (ad.)	Profundidade - z (cm)
Cana-planta					
I	Abril	Novembro	231	0,40	60
II	Novembro	Abril	145	1,25	60
III	Abril	Julho	108	0,75	80
Cana-soca					
I	Julho	Outubro	93	0,40	60
II	Outubro	Março	160	1,25	80
III	Março	Julho	112	0,75	80

Fonte: adaptado de Machado et al. (1982), Sinclair et al. (2004), Silva et al. (2005) e Allen et al. (2006).

* I - brotação a intenso perfilhamento; II - crescimento em estatura; III - diminuição, crescimento e acúmulo de sacarose.

2.2.3 Caracterização agroclimática

A caracterização agroclimática baseou-se na metodologia proposta por EMBRAPA (2009), que indica índices de classificação de risco climático. Foram necessários dados da fenologia da cana-de-açúcar, retenção de água no perfil do solo e elementos climatológicos, que foram inseridos em um balanço hídrico diário local, possibilitando o acompanhamento dos fatores de restrição do cultivo ao longo das safras. O risco de geadas no local baseou-se nos dados e considerações feitas por Wrege et al. (2005), sendo considerado não restritivo ao desenvolvimento da cana-de-açúcar (0,26%).

Na análise de aptidão climática da cana-de-açúcar para Paranavaí-PR, foram consideradas as classificações propostas por EMBRAPA (2009) (Tabela 2.2).

Tabela 2.2. Parâmetros de classificação de risco, conforme EMBRAPA (2009).

Classificação	Risco	Consideração	Temp. média	$ISNA^*$	Risco geada	Deficiência hídrica
A – Indicada	Baixo	Não há.	> 19 °C	> 0,6	< 20%	< 200 mm
B – Indicada	Baixo	Irrigação de salvamento	> 19 °C	> 0,6	< 20%	200 - 400 mm
C - Não indicada	Alto	Risco de geada/carência térmica	< 19 °C	> 0,6	> 20%	200 - 400 mm
D - Não indicada	Alto	Irrigação intensiva	> 19 °C	< 0,6	< 20%	> 400 mm
E - Não indicada	Alto	Excesso de água	–	–	–	–

Fonte: adaptado de EMBRAPA (2009).

* $ISNA$ – Índice de Satisfação das Necessidades de Água

2.2.4 Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA)

O Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA) corresponde a um valor adimensional variando de zero a um, sendo que valores próximos a um indicam suprimento hídrico ideal. Seu cálculo é realizado com a expressão:

$$ISNA_i = \frac{\sum_{j=1}^n ER_j}{\sum_{j=1}^n ETc_j}$$

Sendo: $ISNA_i$ – índice de satisfação das necessidades de água da i -ésima fase de desenvolvimento (adimensional); ER_j – evapotranspiração real da cultura no j -ésimo dia (mm dia^{-1}); ETc_j – evapotranspiração da cultura no j -ésimo dia (mm dia^{-1}); n – número de dias correspondente a i -ésima fase de desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar.

2.2.5 Estimativa do balanço hídrico do local

A estimativa das componentes do balanço hídrico (armazenamento, evapotranspiração real, deficiência, excedente) foi realizada com auxílio do programa computacional “*MORETTI* – Módulo: Balanço hídrico sequencial (Periodicidade: 1, 5, 7, 10 15 e 30 dias), Versão 1.0” (Souza, 2008), que foi desenvolvido baseando-se na metodologia proposta por Thornthwaite & Mather (1955). As análises consistiram em um balanço hídrico sequencial diário, sendo necessários os seguintes dados de entrada: precipitação pluviométrica diária (P); evapotranspiração de referência diária (ET_o); coeficiente de cultivo (kc) da cultura de cana-de-açúcar, em suas várias fases de desenvolvimento, para transformar ET_o em ET_c ; capacidade de água disponível (CAD); e, fração de água disponível (p) da cultura de cana-de-açúcar, em suas várias fases de desenvolvimento, para calcular a água disponível no solo (AD). Como saída, o balanço hídrico estima os valores diários de armazenamento da água no solo (Arm), a evapotranspiração real (ER), deficiência (Def) e excedente hídrico (Exc).

Todas as análises de simulação dos balanços hídricos foram realizadas no Laboratório de Modelagem de Sistemas Agrícolas (LAMOSA)/DSEA/SCA/UFPR, em Curitiba, Paraná.

2.2.6 Dados climáticos utilizados

A precipitação e demais dados agrometeorológicos necessários para estimar a ET_o (radiação solar, temperatura do ar, umidade atmosférica e velocidade do vento) foram fornecidos pelo Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR). Foram analisadas as séries de

dados agrometeorológicos disponíveis na região de Paranavaí (12 anos: 1997 a 2009), coletadas em uma estação climatológica automática. A tabulação e organização dos dados fornecidos foram processadas em planilha eletrônica.

As falhas de leitura foram preenchidas de acordo com o número de dias contendo falhas. Para precipitação, foi atribuído o valor de precipitação nulo (sem chuva) para os dias sem dados. Para os demais dados agrometeorológicos (temperatura máxima e mínima do ar, umidade relativa e velocidade do vento, adotou-se o seguinte critério: (a) intervalos com até dois dias sem dados foram preenchidos com a média do intervalo; (b) para intervalos maiores, os dados foram preenchidos com a média dos demais anos, para o mesmo período.

2.2.7 Precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ET_o)

Para a precipitação não houve nenhum procedimento de cálculo, os dados foram somente organizados para melhor manipulação, pois as estações meteorológicas do SIMEPAR fazem a medição de dados pluviométricos.

A evapotranspiração de referência diária (ET_o) foi estimada com o método de Penman-Monteith parametrizada pela FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (Allen et al., 1998). O método necessita dos seguintes dados meteorológicos: insolação observada (n), temperatura máxima (T_{max}) e mínima (T_{min}) do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento a dois metros de altura (U_z).

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma_{psy} \cdot \frac{900}{(T + 273)} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma_{psy} \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)}$$

Sendo: ET_o – evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); Δ – declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); R_n – radiação líquida na superfície ($\text{MJ m}^2 \text{d}^{-1}$); G – balanço do fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); γ_{psy} – constante psicométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); T – temperatura média do ar ($^\circ\text{C}$); u_2 – velocidade do vento a dois metros de altura (m s^{-1}); e_s – pressão de saturação de vapor (kPa); e_a – pressão atual do vapor (kPa).

O valor da radiação solar incidente (R_s) foi estimada com uma equação recomendada por Allen et al. (2006):

$$Rs = Krs \cdot (T_{\max} - T_{\min})^{0,5} \cdot Ra$$

Sendo: Rs – radiação solar incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); Krs – coeficiente empírico ($^{\circ}\text{C}^{-0,5}$), sendo igual a 0,16 para regiões continentais; T_{\max} – temperatura máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$); T_{\min} – temperatura mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$); Ra – radiação solar incidente no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

2.2.8 Atributos físico-hídricos do solo

Para caracterização dos parâmetros físico-hídricos do solo, as amostras deformadas e indeformadas de solo foram coletadas na área experimental em oito pontos de coleta, subdividido em três profundidades (0-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm). As análises foram realizadas no Laboratório de Física do Solo/SCA/UFPR.

A amostragem de solo para determinação da massa específica e dos pontos da curva de retenção da água no solo foi realizada pelo método do anel volumétrico. As análises seguiram as metodologias descritas por EMBRAPA (1997).

A partir da determinação dos parâmetros da curva de retenção da água no solo e da análise granulométrica do solo os parâmetros θ_r , θ_s , α , m e n da equação de Van Genuchten (1980) foram estimados com o programa SPLINTEX, versão 1.0 (Prevedello, 1999). As umidades do solo na capacidade de campo e ponto de murcha permanente foram determinadas considerando a tensão de 0,009 MPa e 1,470 MPa, respectivamente.

A capacidade de água disponível no solo (CAD) foi determinada por meio da seguinte função:

$$CAD_i = 0,01 \cdot (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \cdot z_i$$

Sendo: CAD_i – capacidade de água disponível no solo na i -ésima fase de desenvolvimento (mm); θ_{CC} – umidade do solo na capacidade de campo, com base em volume (%); θ_{PMP} – umidade do solo no ponto de murcha permanente, com base em volume (%); z_i – profundidade efetiva do sistema radicular na i -ésima fase de desenvolvimento (mm).

Os valores de água disponível no solo (AD) foram determinados considerando a fração $p = 0,65$ para a cultura da cana-de-açúcar, conforme recomendação da FAO (Allen et al., 2006).

$$AD_i = CAD_i \cdot p$$

Sendo: AD_i – água disponível no solo na i -ésima fase de desenvolvimento (mm); CAD_i – capacidade de água disponível do solo na i -ésima fase de desenvolvimento (mm); p – fração de água disponível no solo para um determinado tipo de cultura (adimensional).

2.2.9 Armazenamento da água no solo (Arm)

Para o acompanhamento do armazenamento de água no solo e/ou “negativo acumulado”, foi utilizada a equação Cossenoidal, proposta por Rijtema & Aboukhaled (1975). Para o cálculo, o programa computacional utilizado considera as seguintes condições:

Se $CAD(1 - p) < Arm \leq CAD$, ou seja, zona úmida, então:

$$Arm = CAD - L$$

Senão, se $0 < Arm \leq CAD(1 - p)$, ou seja, na zona seca, então:

$$ARM = (1 - p) \cdot CAD \cdot \left\{ 1 - \frac{2}{\pi} \cdot \arctg \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{|L| - CAD \cdot p}{(1 - p) \cdot CAD} \right) \right] \right\}$$

Sendo: CAD – capacidade de água disponível (mm), Arm – armazenamento de água do solo (mm); L – negativo acumulado (mm); p – fração de água disponível no solo para uma determinada cultura (adimensional).

2.2.10 Cálculo da evapotranspiração da cultura (ETc)

Os valores de evapotranspiração da cultura (ETc) foram calculados utilizando a seguinte equação:

$$ETc = ETo \cdot kc$$

Sendo: ETc – evapotranspiração da cultura (mm dia^{-1}); ETo – evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); kc – coeficiente de cultivo (adimensional).

Foram utilizados os valores de kc recomendados pela FAO (Allen et al., 2006), conforme disposto na Tabela 2.1.

2.2.11 Distribuições de frequência e probabilidade das componentes do balanço hídrico

Os parâmetros estatísticos de frequência e probabilidade das componentes do balanço hídrico foram determinados com o programa computacional “*MORETTI* – Módulo:

Distribuição de frequência e teste de aderência, versão 2.0”, juntamente com rotinas em planilhas eletrônicas desenvolvidas especificamente para essa finalidade.

Os valores diários das componentes do balanço hídrico (*ET_o*, *P*, *ARM*, *ER*, *Def*, *Exc* e *I*) foram agrupados em períodos de dez dias (decêndios). Posteriormente, verificou-se o ajustamento dos valores decendiais às distribuições de probabilidade Gama, Normal, Exponencial, Triangular e Uniforme, com a finalidade de obter os parâmetros estatísticos da distribuição de melhor ajuste. Nas análises, utilizou-se o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov, à 5% de probabilidade.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Caracterização climática de Paranavaí-PR

O local do experimento apresentou no período estudado (1997 a 2009) temperatura média anual do ar de 22,9 °C, variando entre 19,0 °C no mês mais frio (julho) e 25,5 °C no mês mais quente (fevereiro). O menor valor diário de temperatura verificado no local, para o período analisado, foi de 0,2 °C (dia 13/07/00). O maior valor diário de temperatura foi de 38,8 °C (dia 29/10/07).

A precipitação média anual da região (Figura 2.1) foi de 1422,1 mm ano⁻¹, com a precipitação mensal variando entre zero (agosto/99, agosto/07 e setembro/07) e 469,8 mm mês⁻¹ (outubro/09). No período estudado (1997 a 2009) constatou-se precipitação média de 1671,8 e 1357,4 mm ciclo⁻¹ para cana-planta e cana-soca, respectivamente. Doorenbos & Kassam (1979) relatam que a necessidade hídrica da cana-de-açúcar fica em torno de 1500 a 2500 mm por ciclo vegetativo. O valor especificado pelos autores foi superior ao encontrado para o ciclo de cana-soca e satisfatório para o ciclo de cana-planta, em Paranavaí-PR. No entanto, baseando-se nas considerações de Dantas Neto (2006), verificou-se que a ocorrência das chuvas ao longo dos anos estudados ficou próxima aos valores indicados ao cultivo da cana-de-açúcar, com boa distribuição dos volumes de chuvas durante o crescimento vegetativo da cultura.

A Figura 2.1 permite observar, em média, a tendência da evapotranspiração da cultura (*ETc*) e precipitação pluviométrica (*P*) nas safras, sendo possível verificar períodos em que a precipitação pluviométrica esperada foi menor do que o valor da demanda hídrica. Verificou-se também que a evapotranspiração da cultura (*ETc*), para os ciclos de cana-planta e cana-soca, acompanharam a tendência da precipitação ao longo dos anos estudados.

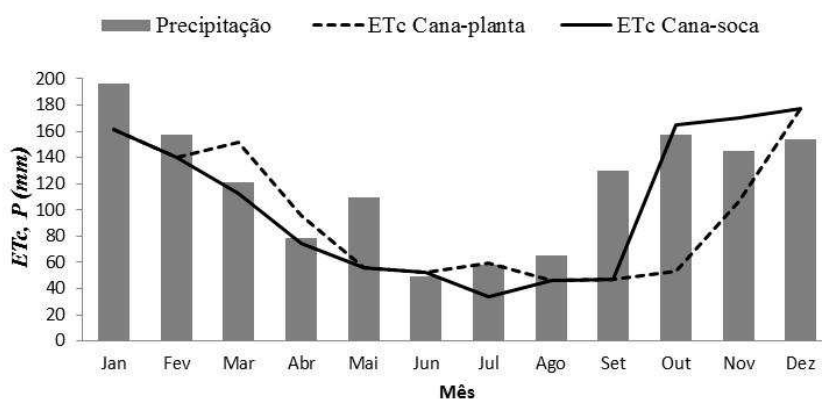


Figura 2.1 – Valores médios mensais de evapotranspiração da cultura (*ETc*) e precipitação (*P*) para Paranavaí-PR, no período de 1997 a 2009.

2.3.2 Caracterização dos atributos físico-hídricos do solo

Os atributos físico-hídricos do solo da Estação Experimental indicaram que o mesmo possui textura média, com teor de areia entre 81,9% e 87,7%, apresentando uniformidade textural em profundidade (Tabela 2.3), com massa específica do solo variando de 1,5 a 1,7 g cm⁻³.

Tabela 2.3. Média, desvio padrão e coeficiente de variação da textura e massa específica do solo, encontrados na Estação Experimental de Paranavaí-PR, nas profundidades avaliadas.

Parâmetro		----- Profundidade (cm) -----		
		0 a 20	20 a 40	40 a 60
Areia	Teor (%)	84,77	84,22	82,17
	Desvio Padrão (%)	1,30	3,10	1,88
	Coeficiente de variação (%)	1,53	3,68	2,29
Silte	Teor (%)	1,40	1,28	1,17
	Desvio Padrão	0,23	0,25	0,16
	Coeficiente de variação (%)	16,40	19,61	13,78
Argila	Teor (%)	13,83	14,50	16,67
	Desvio Padrão (%)	1,53	3,04	2,02
	Coeficiente de variação (%)	11,04	20,97	12,12
Massa específica	Média (g cm ⁻³)	1,64	1,61	1,62
	Desvio Padrão (%)	0,06	0,11	0,05
	Coeficiente de variação (%)	3,64	6,63	3,27

Vitti & Mazza (2002) comentam que solos agrícolas arenosos voltados à produção de cana-de-açúcar, promovem crescimento radicular mais rápido. Entretanto, os autores sugerem que são necessários maiores cuidados nas práticas de manejo da fertilidade do solo, pois a perda de nutrientes nesses solos pode ser acentuada devido à maior drenagem do solo. Para Dias (1999) a drenagem elevada pode constituir um regime hídrico limitante, causando baixos rendimentos agrícolas, sendo necessário, além do conhecimento das características químicas e físicas do solo, o entendimento da inter-relação entre o desenvolvimento radicular e a absorção de água e nutrientes. Ido et al. (2006) trabalhando com cana-de-açúcar em solo arenoso e argiloso verificaram que, além das características físico-químicas do solo, o desenvolvimento radicular também está relacionado ao potencial de adaptação de cada cultivar em elevar a produção radicular em quantidade e profundidade, proporcionando melhor exploração e utilização do substrato.

Os valores de umidade do solo na capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e capacidade de água disponível (CAD) do solo da Estação Experimental estão apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4. Média, desvio padrão e coeficiente de variação da umidade na capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e capacidade de água disponível no solo (CAD), dos pontos amostrados na Estação Experimental de Paranavaí-PR, em diferentes profundidades.

Parâmetro		----- Profundidade (cm) -----			
		0 a 20	20 a 40	40 a 60	60 a 80*
θ_{CC}	Média ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0,10	0,22	0,21	0,21
	Desvio Padrão ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0,01	0,03	0,00	0,00
	Coeficiente de variação (%)	7,73	15,32	0,69	0,69
θ_{PMP}	Média ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0,06	0,07	0,07	0,07
	Desvio Padrão ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0,00	0,00	0,00	0,00
	Coeficiente de variação (%)	3,99	3,09	5,35	5,35
CAD	Média (mm)	6,84	29,79	28,64	28,64
	Desvio Padrão (mm)	1,00	7,17	0,43	0,43
	Coeficiente de variação (%)	14,70	24,07	1,51	1,51

* Parâmetros estimados.

Verificou-se para o LATOSSOLO VERMELHO Distrófico da Estação Experimental de Paranavaí que os valores de CAD cresceram até a profundidade de 20 a 40 cm (Tabelas 2.3 e 2.4).

2.3.3 Análise do balanço hídrico

Os Apêndices 1 (Figuras A1.1 a A1.12) e 2 (Tabelas A2.1 a A2.12) contêm a representação gráfica diária da ET_c , P e ER , obtida nas análises cultivando a cana-planta e cana-soca, respectivamente, nas safras 1997/98 a 2008/09, em Paranavaí-PR. Como ilustração, as Figuras 2.2 a 2.3 contêm a representação gráfica da safra 1998/1999, para cultura da cana-de-açúcar, na região de Paranavaí-PR, para os ciclos de cana-planta e cana-soca, respectivamente. Os valores de ET_o , ET_c , P , ER , Def e Exc dispostos nas Tabelas 2.5 e 2.6, para a cana-planta e cana-soca, respectivamente, resultaram da análise, identificação e somatório de cada período específico, conforme pode ser visto como exemplo nas Figuras 2.2 e 2.3.

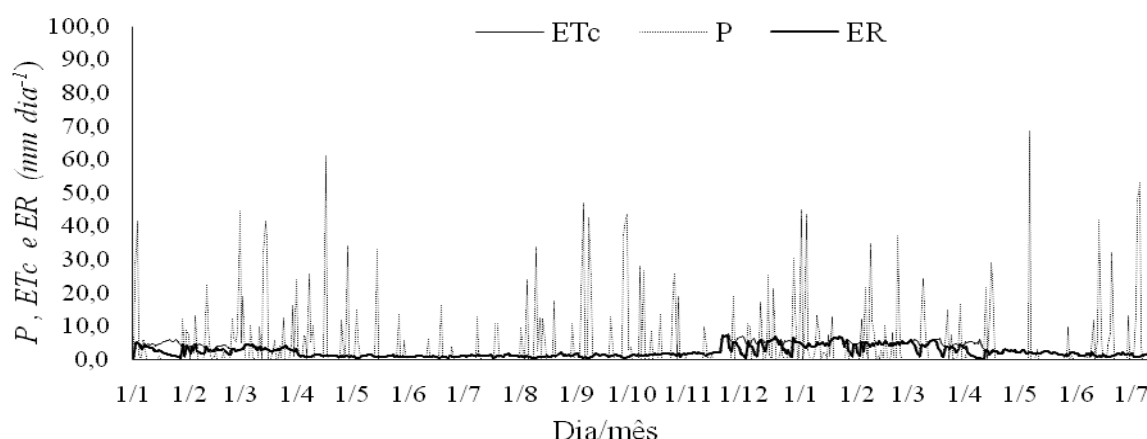


Figura 2.2 – Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração real (ER) para o cultivo da cana-planta, na safra 1998/1999, em Paranavaí-PR.

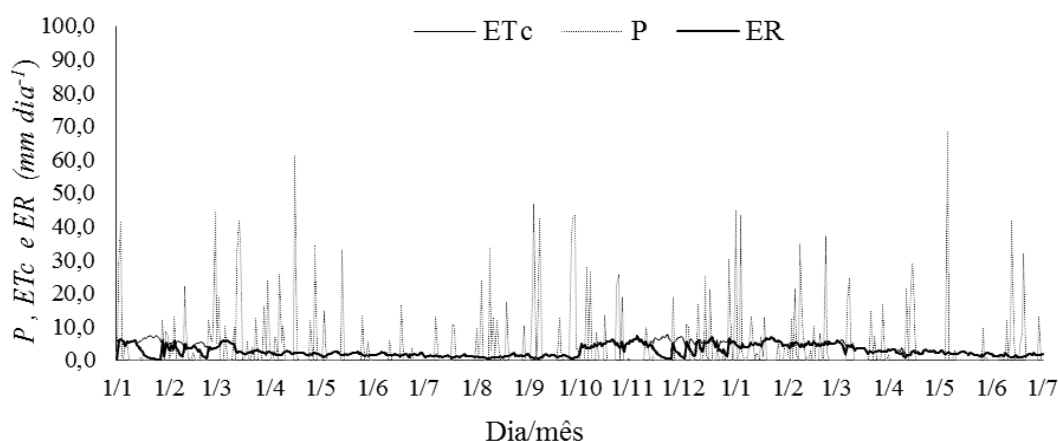


Figura 2.3 – Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ER) para o cultivo da cana-soca, na safra 1998/1999, em Paranavaí-PR.

O conhecimento da deficiência ocorrida no ciclo total da planta é fundamental para o entendimento dos parâmetros de restrição ao desenvolvimento da cana-de-açúcar. Os Apêndices 3 (Figuras A3.1 a A3.12) e 4 (Tabelas A4.1 a A4.12) contêm a representação gráfica da Def e Exc , obtida nas análises cultivando a cana-planta e cana-soca, respectivamente, nas safras 1997/98 a 2008/09, em Paranavaí-PR. Como ilustração, as Figuras 2.4 a 2.5 contêm a representação gráfica da safra 1998/1999, para cultura da cana-de-açúcar, na região de Paranavaí-PR, para os ciclos de cana-planta e cana-soca, respectivamente. Os valores de Def e Exc , também dispostos nas Tabelas 2.5 e 2.6 para a cana-planta e cana-soca, respectivamente, resultaram da análise e identificação e somatório de cada período específico, conforme pode ser visto como exemplo nas Figuras 2.4 a 2.5.

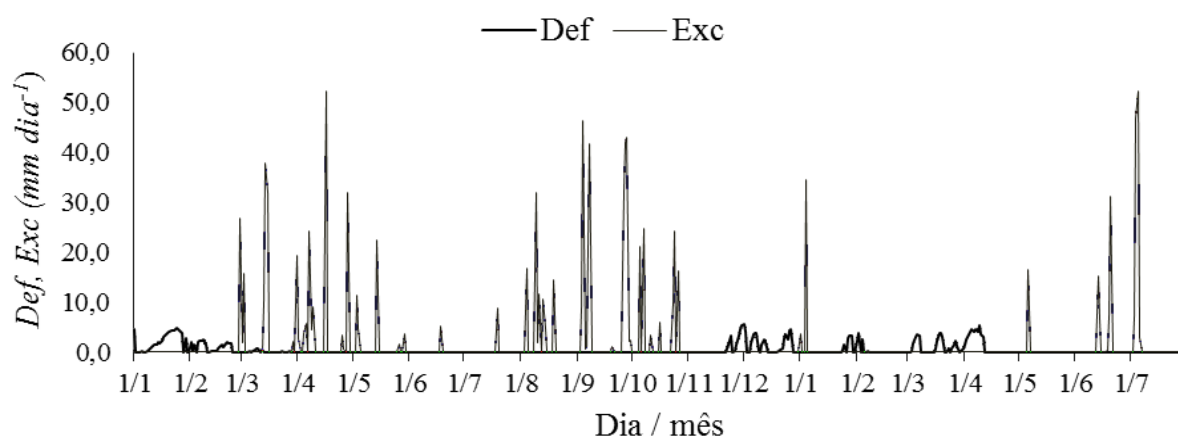


Figura 2.4 – Deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*) para o cultivo da cana-planta, na safra 1998/1999, em Paranavaí-PR.

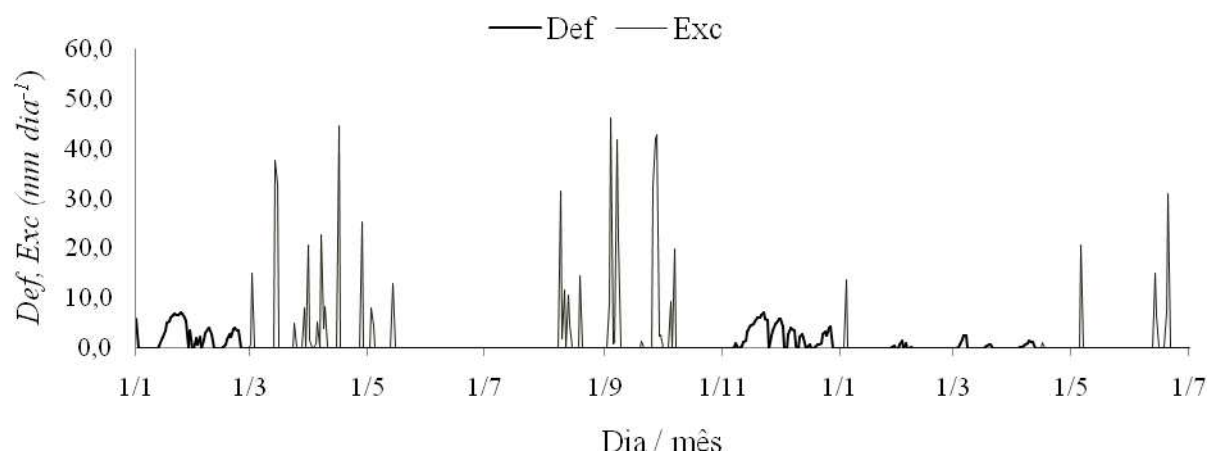


Figura 2.5 – Deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*) para o cultivo da cana-soca, na safra 1998/1999, em Paranavaí-PR.

A cana-planta com plantio em abril sofreu estresse hídrico na fase de desenvolvimento, em parte da fase de maturação, compreendendo um período entre os meses de dezembro a maio (seis meses). A cana-soca, cuja rebrota ocorreu em julho, sofreu estresse hídrico na fase de desenvolvimento, em parte da fase de maturação, durante os meses de outubro a abril (seis meses) (Apêndice 3).

Os valores totais das componentes do balanço hídrico sequencial diário, para os ciclos cana-soca e cana-planta, obtidos nas safras 1997/1998 e 2008/2009, em Paranavaí-PR, estão apresentados nas Tabelas 2.5 e 2.6.

Tabela 2.5. Componentes do balanço hídrico (ET_o , ET_c , ER , P , Def e Exc), realizado para as safras 1997/1998 e 2008/2009 de cana-planta, em Paranavaí-PR.

Safra	ET_o	ET_c	ER	P	Def	Exc	ER/ET_c
	----- (mm safra ⁻¹) -----						
1997/98	1593,5	1218,3	1074,6	1829,6	143,7	805,9	0,88
1998/99	1529,7	1214,3	1049,1	1879,6	165,2	862,4	0,86
1999/00	1752,6	1341,7	1003,5	1626,2	338,2	592,4	0,75
2000/01	1618,0	1234,5	1160,3	1875,6	74,3	708,1	0,94
2001/02	1685,3	1306,0	1042,2	1819,4	263,8	792,8	0,80
2002/03	1700,3	1279,5	1127,2	1948,4	152,4	811,8	0,88
2003/04	1642,9	1269,6	1024,6	1805,4	245,1	743,0	0,81
2004/05	1631,6	1293,5	854,8	1907,6	438,7	1045,1	0,66
2005/06	1660,6	1283,7	940,9	1636,8	342,8	702,9	0,73
2006/07	1714,1	1304,2	1093,2	1589,0	211,0	474,6	0,84
2007/08	1728,1	1312,6	875,6	1127,8	437,0	269,9	0,67
2008/09	1654,4	1292,7	596,7	1016,0	696,1	451,7	0,46
Média	1659,3	1279,2	986,9	1671,8	292,3	688,4	0,77
<i>s</i>	62,3	39,0	154,2	304,1	171,9	210,5	0,13
CV	3,8	3,1	15,6	18,2	58,8	30,6	16,93

* *s* – desvio padrão; CV – coeficiente de variação.

Tabela 2.6. Componentes do balanço hídrico (ET_o , ET_c , ER , P , Def e Exc), realizado para as safras 1997/1998 e 2008/2009 de cana-soca, em Paranavaí-PR.

Safra	ET_o	ET_c	ER	P	Def	Exc	ER/ET_c
	----- (mm safra ⁻¹) -----						
1997/98	1279,5	1180,0	1067,3	1625,0	112,7	551,6	0,90
1998/99	1235,3	1174,0	1020,6	1492,6	153,5	443,0	0,87
1999/00	1442,5	1320,0	913,7	1251,6	406,3	341,1	0,69
2000/01	1268,0	1198,6	1068,3	1659,0	130,4	586,9	0,89
2001/02	1387,6	1270,6	1043,2	1439,0	227,5	464,2	0,82
2002/03	1330,9	1233,7	1056,5	1479,2	177,2	408,6	0,86
2003/04	1327,8	1250,5	962,0	1508,8	288,4	500,3	0,77
2004/05	1359,4	1249,0	879,8	1284,6	369,3	426,1	0,70
2005/06	1294,6	1203,9	951,0	1373,8	252,9	433,1	0,79
2006/07	1382,0	1263,9	1026,6	1359,8	237,3	369,3	0,81
2007/08	1363,4	1252,6	791,9	1003,6	460,7	147,6	0,63
2008/09	1367,4	1256,9	661,5	812,6	595,4	221,9	0,53
Média	1336,5	1237,8	953,5	1357,5	284,3	407,8	0,77
<i>s</i>	58,9	42,1	125,5	245,7	147,2	126,1	0,11
CV	4,4	3,4	13,2	18,1	51,8	30,9	14,74

* *s* – desvio padrão; CV – coeficiente de variação.

Para cana-planta (Tabela 2.5), apenas 33,3% das safras analisadas apresentaram deficiência hídrica (*Def*) acumulada, ao longo das safras, inferiores a 200 mm safra⁻¹. Conforme EMBRAPA (2009), os valores de deficiência hídrica obtidos são considerados limitantes para que o cultivo da cana-de-açúcar obtenha classificação de risco climático “A – Indicada”. Para a classificação de risco climático “B – Indicada”, a qual abrange o intervalo de deficiência hídrica entre 200 e 400 mm safra⁻¹, 41,7% das safras analisadas se enquadram nesse intervalo, tendo como ressalva para o cultivo a irrigação de salvamento. A deficiência hídrica (*Def*) acumulada ao longo das safras para cana-planta variou entre 74,3 a 696,1 mm safra⁻¹. O excedente hídrico (*Exc*) acumulado ficou entre 269,9 e 1045,1 mm safra⁻¹.

Para cana-soca (Tabela 2.6), o déficit hídrico (*Def*) acumulado ao longo das safras, apresentou o mesmo percentual dentro das classes de risco climático recomendadas por EMBRAPA (2009), para cana-de-açúcar, ficando entre 112,7 e 595,4 mm safra⁻¹. O excedente hídrico (*Exc*) acumulado ficou entre 147,6 e 586,9 mm safra⁻¹.

Conhecer a deficiência ocorrida no ciclo total da planta é importante (Tabelas 2.5 e 2.6), entretanto, os valores podem não representar o efeito do estresse hídrico nas diferentes fases de desenvolvimento, pois o grau de injúria promovido pelo estresse depende consideravelmente da fase de desenvolvimento da planta (Wiedenfeld, 2000; Farias et al., 2008). Nesse sentido, a Tabela 2.7 permite observar os valores das componentes do balanço hídrico sequencial, para os ciclos de cana-planta e cana-soca, nas fases de desenvolvimento I, II e III.

Tabela 2.7. Média das componentes do balanço hídrico (*ET_o*, *ET_c*, *ER*, *P*, *Def* e *Exc*), nas diferentes fases de desenvolvimento da cana-planta e cana-soca, realizado para as safras 1997/1998 e 2008/2009, em Paranavaí-PR.

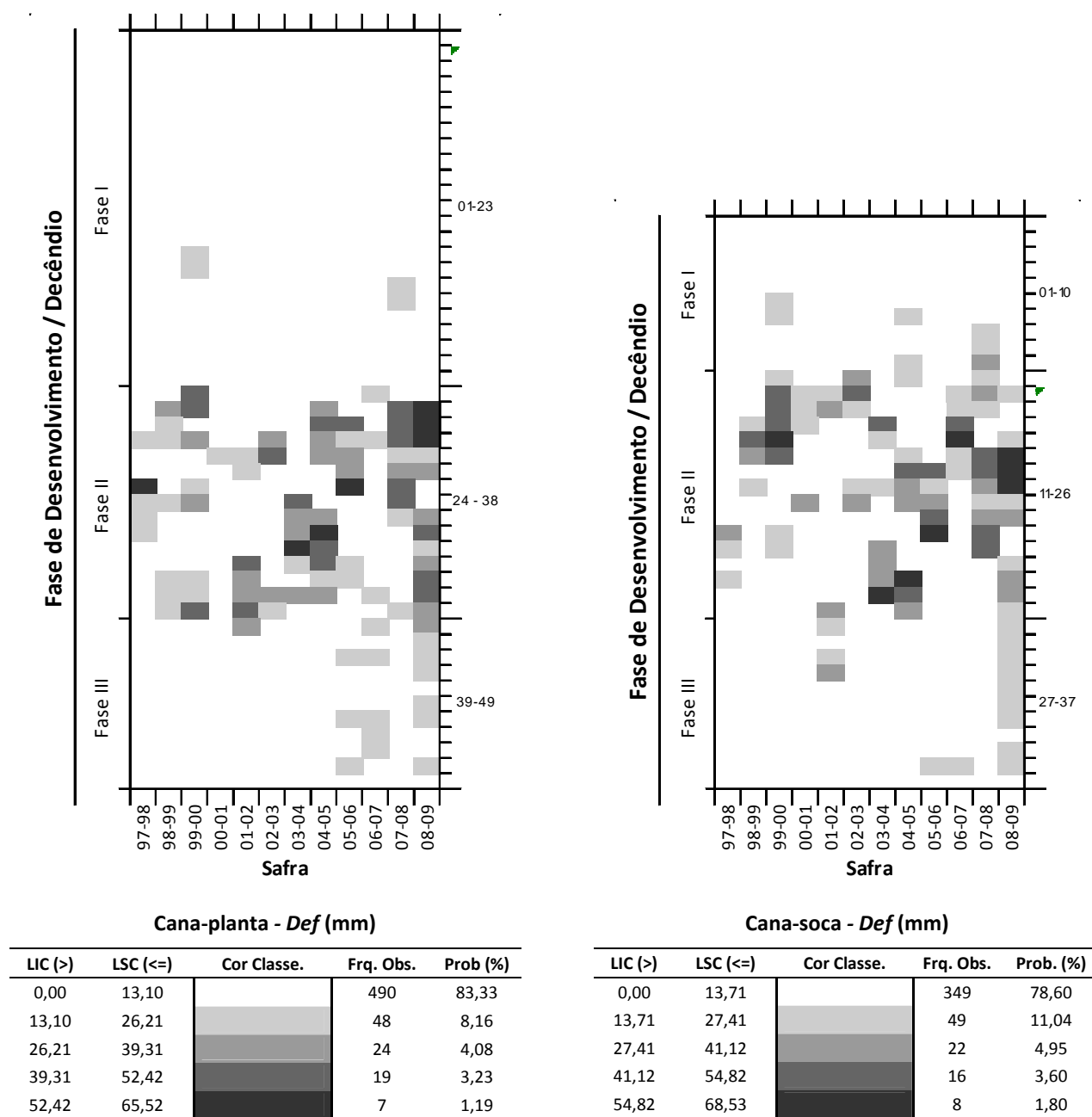
Fase de desenvolvimento	<i>ET_o</i>	<i>ET_c</i>	<i>P</i>	<i>P – ET_c</i>	<i>ER</i>	<i>Def</i>	<i>Exc</i>
	----- (mm fase ⁻¹) -----						
Cana-planta							
I	771,5	308,6	735,4	426,7	292,0	16,6	428,0
II	611,7	764,7	643,8	-120,9	528,1	236,5	158,0
III	282,0	211,5	278,3	66,8	158,8	52,7	91,7
Cana-soca							
I	318,7	127,5	270,6	143,1	112,3	15,2	146,7
II	697,2	871,2	753,7	-117,5	627,9	243,3	144,4
III	325,8	244,4	308,8	64,4	203,0	41,4	103,7

De acordo com Machado et al. (2009), o déficit hídrico ocasiona redução significativa da produção nas três fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar. As análises de balanço hídrico realizadas nas safras 1997/1998 a 2008/2009 indicaram que todas as fases de desenvolvimento apresentaram deficiência e excedente hídrico. A fase de desenvolvimento II apresentou maiores valores de deficiência em relação aos demais, tanto para o ciclo cana-planta como cana-soca. É interessante observar que a fase II, corresponde ao período de maior desenvolvimento para planta, demandando maiores quantidades de água para o seu desenvolvimento.

2.3.4 Distribuição de frequência das componentes decendiais do balanço hídrico

Os Apêndices 5 (Figuras A5.1 a A5.4) e 6 (Figuras A6.1 a A6.4) contêm uma série de distribuição de frequência das componentes decendiais do balanço hídrico (ET_o , ET_c , P , Arm , ER , Def , Exc), para a cultura da cana-planta e cana-soca, nas safras 1997/98 a 2008/09, em Paranavaí-PR. A Figura 2.6 ilustra a evolução da deficiência hídrica ocorrida nas fases I, II e III de desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, nas safras 1997/98 a 2008/09, para os ciclos de cana-planta e cana-soca. Pode-se observar que a deficiência hídrica, para os períodos analisados, comportou-se de forma similar para os ciclos de cana-planta e cana-soca. As fases de desenvolvimento I e III apresentaram no período analisado (1997 a 2009) predominantemente deficiência hídrica inferior a $13,7 \text{ mm decêndio}^{-1}$, não indicando fator de restrição ao desenvolvimento da cana-de-açúcar. Na fase de desenvolvimento II (desenvolvimento) observou-se elevada ocorrência de valores de deficiência hídrica superiores a $13,1 \text{ mm decêndio}^{-1}$, indicando que a cultura poderá sofrer redução de produção em função da deficiência ocorrida no período.

A distribuição de frequência dos valores decendiais de deficiência (Def) para cana-planta evidenciou, para o período analisado (1997 a 2009) e considerando as fases de desenvolvimento I a III, que 83,3% dos decêndios tiveram deficiência hídrica inferior a $13,1 \text{ mm decêndio}^{-1}$. Fazendo-se uma análise isolada para a fase de desenvolvimento II, evidenciou que 69,9% dos decêndios apresentaram valores de deficiência hídrica inferiores a $13,7 \text{ mm decêndio}^{-1}$. Para cana-soca, a distribuição de frequência da deficiência (Def) evidenciou para as fases de desenvolvimento I a III que 78,7% dos decêndios tiveram deficiência hídrica inferior a $13,7 \text{ mm decêndio}^{-1}$. De forma geral, os valores de deficiência superiores a $13,7 \text{ mm decêndio}^{-1}$ concentraram na fase de desenvolvimento II, correspondendo a 27,2% dos decêndios.



Sendo: LIC – limite inferior da classe; LSC – limite superior da classe; Cor Classe – cor da classe apresentada no diagrama de distribuição de frequência em cores; Frq. Obs. – frequência observada em cada classe; Prob. (%) – probabilidade observada encontrada para cada classe (%).

Figura 2.6 – Distribuição de frequência dos valores decendiais de deficiência (*Def*), para cana-planta e cana-soca, nas safras 1997/98 a 2008/09, em Paranavaí-PR.

2.3.5 Parâmetros estatísticos e probabilidade das componentes do balanço hídrico

O Apêndice 7 (Tabela A7.1) contém os parâmetros estatísticos para as componentes decendiais do balanço hídrico (*ET_o*, *ET_c*, *ER*, *P*, *Def* e *Exc*), no cultivo da cana-planta e cana-soca, respectivamente, nas safras 1997/98 à 2008/09, em Paranavaí-PR, considerando o ciclo

total. O Apêndice 8 (Tabelas A8.1 e A8.2) contém os parâmetros estatísticos decendiais para as componentes do balanço hídrico (*ETo*, *ETc*, *ER*, *P*, *Def* e *Exc*), considerando as fases de desenvolvimento da cultura da cana-planta e cana-soca, respectivamente, nas safras 1997/98 a 2008/09, em Paranaíba-PR.

Analisando-se o Apêndice 7 (Tabela A7.1) verificou-se para os ciclos cana-planta e cana-soca que as componentes *ETo*, *P*, *Def* e *Exc* ajustaram-se a distribuição Gama. As componentes *ETc*, *Arm* e *ER* não apresentaram ajustamento a nenhuma das distribuições testadas. A Tabela A7.1 contém uma série de parâmetros estatísticos para as componentes do balanço hídrico no período analisado (menor e maior valor, média, desvio padrão, moda), incluindo a probabilidade de ocorrência de valores nulos e a 75%. Como exemplo, para a cana-planta, verificou-se que a evapotranspiração de referência (*ER*) apresentou média de 20,4 mm decêndio⁻¹, sendo o menor e maior valor igual a 1,2 e 59,0 mm decêndio⁻¹, respectivamente. Os valores de *ER* não apresentaram ajustamento com nenhuma das distribuições testadas. A deficiência hídrica (*Def*) variou entre 1,1 e 65,5 mm decêndio⁻¹, tendo média 19,1 mm decêndio⁻¹. A distribuição Gama apresentou o melhor ajuste entre as distribuições testadas para *Def*, sendo 75% a probabilidade de ocorrer $Def \leq 5,6$ mm decêndio⁻¹. A probabilidade de não ocorrer deficiência decendial (deficiência zero) foi de 68,4%. A Tabela A7.1 permitiu verificar também que os parâmetros estatísticos das componentes do balanço hídrico para os ciclos cana-planta e cana-soca foram similares.

O Apêndice 8 apresenta os parâmetros estatísticos para as componentes do balanço hídrico, considerando as fases de desenvolvimento da cultura da cana-planta e cana-soca (safras 1997/98 à 2008/09). Analisando-se o referido apêndice verificou-se que:

- Para o ciclo cana-planta, dentre as distribuições de probabilidade testadas, 63,6% das fases ajustaram a distribuição Gama, 18,2% à Normal, 4,5% à Triangular, 4,5% à Uniforme e 4,5% à Exponencial. Apenas a componente *Arm* da fase I não apresentou ajuste a nenhuma das distribuições testadas (Tabela A8.1);
- Para o ciclo cana-soca, dentre as distribuições de probabilidade testadas, 42,9% das fases ajustaram a distribuição Gama, 33,3% à Normal, 19,0% à Exponencial, 4,8% à Triangular. Todas as componentes apresentaram ajuste em pelo menos uma das distribuições testadas (Tabela A8.2);
- As análises da evapotranspiração da cultura (*ETc*) demonstraram para a fase de desenvolvimento I, cana-planta e cana-soca, que a distribuição de probabilidade Normal e

Gama apresentaram melhor ajuste, respectivamente. Para as fases de desenvolvimento II e III, a distribuição de probabilidade que melhor se ajustou aos valores da ET_c , foi a distribuição Gama para cana-planta e Normal para cana-soca. Desta forma, as três fases de desenvolvimento analisadas não apresentaram concordância entre as distribuições ajustadas, indicando que os ciclos de cana-planta e cana-soca apresentam diferenças na tendência da ET_c para os dois ciclos (Tabela A8.1 e A8.2);

– Os maiores valores decendiais de ET_c ocorreram na fase de desenvolvimento II, se caracterizando como a fase de desenvolvimento que mais demandou água. Para cana-planta, a fase de desenvolvimento II apresentou valor médio de evapotranspiração da cultura (ET_c) de 51,3 mm decêndio⁻¹, sendo superior em 74,3% e 63,4% a ET_c ocorrida nas fases de desenvolvimento I e III, respectivamente. A evapotranspiração ocorrida na fase de desenvolvimento II da cana-soca foi de 53,1 mm decêndio⁻¹, valor superior em 69,3% e 61,4% aos encontrados nas fases de desenvolvimento I e III, respectivamente (Tabela A8.1 e A8.2);

– Para a cana-planta e cana-soca as análises da evapotranspiração real (ER), demonstraram haver comportamento similar entre os valores obtidos para os dois ciclos, pois houve concordância entre as distribuições de probabilidade que melhor se ajustaram para uma mesma fase de desenvolvimento. No entanto, entre as fases de desenvolvimento, não se constatou concordância entre as distribuições de frequência encontradas, sendo que as distribuições Gama, Triangular e Normal foram as que apresentaram melhor ajuste para as fases de desenvolvimento I, II e III, respectivamente (Tabela A8.1 e A8.2);

– Os maiores valores decendiais de evapotranspiração real (ER) ocorreram na fase de desenvolvimento II, divergindo em apenas 7,7% entre cana-planta e cana-soca. Os valores médios encontrados para essa fase de desenvolvimento foram de 35,9 mm decêndio⁻¹ e 38,9 mm decêndio⁻¹, respectivamente (Tabela A8.1 e A8.2);

– Verificou-se no ciclo cana-planta, entre as três fases de desenvolvimento analisadas, que a fase II evidenciou maiores problemas com a ocorrência de deficiência. Existe 75% de probabilidade de ocorrer $Def \leq 23,9$ mm decêndio⁻¹ na localidade. Em torno de 61,9% dos decêndios que compreenderam a fase II apresentaram deficiência ($Def > 0,0$), com média de 24,9 mm decêndio⁻¹ (Tabela A8.1). O ciclo cana-soca apresentou resultados de Def para as fases I, II e III semelhantes ao ocorrido para cana-planta. Em torno de 57% dos decêndios que compreendem a fase II apresentaram deficiência ($Def > 0,0$), com média de 25,1 mm

decêndio⁻¹ (Tabela A8.2). As fases de desenvolvimento I e III apresentaram risco de $Def > 0$ inferior a 40,6 mm decêndio⁻¹ nos ciclos cana-planta e cana-soca (Tabela A8.1 e A8.2).

2.3.6 Tendência do Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA)

O simples registro do déficit hídrico não implica necessariamente em penalização da produtividade, nesse sentido o Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA) busca dividir em classes os níveis de risco hídrico. De acordo com EMBRAPA (2009), valores superiores a 0,6 indicam que a planta foi suprida de água, não tendo reflexos na produção.

As Figuras 2.7 e 2.8 contêm os ISNAs obtidos no presente estudo para os ciclos de cana-soca e cana-planta, respectivamente, para as safras 1997/98 a 2008/09 analisadas. É possível verificar que os sistemas de cultivo (planta e soca), comportaram-se de maneira semelhante quanto ao suprimento das necessidades hídricas da cana-de-açúcar.

Para cana-planta (Figuras 2.7) todos os períodos correspondentes à fase de desenvolvimento I (brotação a intenso perfilhamento) tiveram valores de ISNA superiores a 0,6, indicando suprimento hídrico adequado para fase. Para a fase de desenvolvimento II (crescimento em estatura) 25,0% dos períodos analisados (safras 2004/05, 2007/08 e 2008/09) apresentaram valores inferiores aos recomendados, indicando possível redução do crescimento da planta devido ao déficit hídrico. Na fase de desenvolvimento III (diminuição do crescimento e acúmulo de sacarose) 25,0% dos períodos analisados (safras 2005/06, 2006/07 e 2008/09) também apresentaram valores inferiores aos recomendados. No entanto, Inman-Bamber & Smith (2005) consideram que é desejável a ocorrência de alguma restrição na fase III, para forçar o repouso fisiológico e o enriquecimento em sacarose.

Para cana-soca (Figuras 2.8) 91,7% dos períodos correspondentes a fase de desenvolvimento I (brotação a intenso perfilhamento) tiveram valores de ISNA superiores a 0,6, indicando suprimento hídrico adequado para fase. Para a fase de desenvolvimento II, (crescimento em estatura) 16,7% dos períodos analisados (safras 2007/08 e 2008/09) apresentaram valores inferiores aos recomendados. Conforme recomendações de Dantas Neto et al. (2006) e Oliveira et al. (2011), a má distribuição e a redução do volume de chuvas durante o crescimento vegetativo da cana-de-açúcar causam queda na produção e redução da vida útil da lavoura, forçando a renovação precoce do canavial. Na fase de desenvolvimento III (diminuição do crescimento e acúmulo de sacarose) apenas 8,3% dos períodos analisados (safra 2008/09) apresentaram valores inferiores aos recomendados.

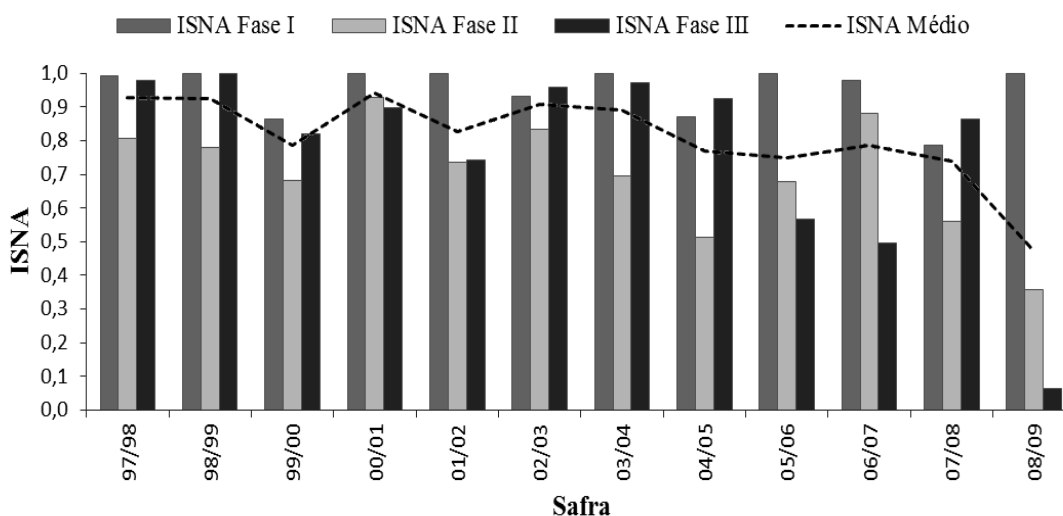


Figura 2.7 – Índice de Satisfação das Necessidades de Água (*ISNA*), considerando as fases de desenvolvimento da cultura da cana de açúcar, ciclo **cana-planta**, nas safras 1997/98 a 2008/09, em Paranavaí-PR.

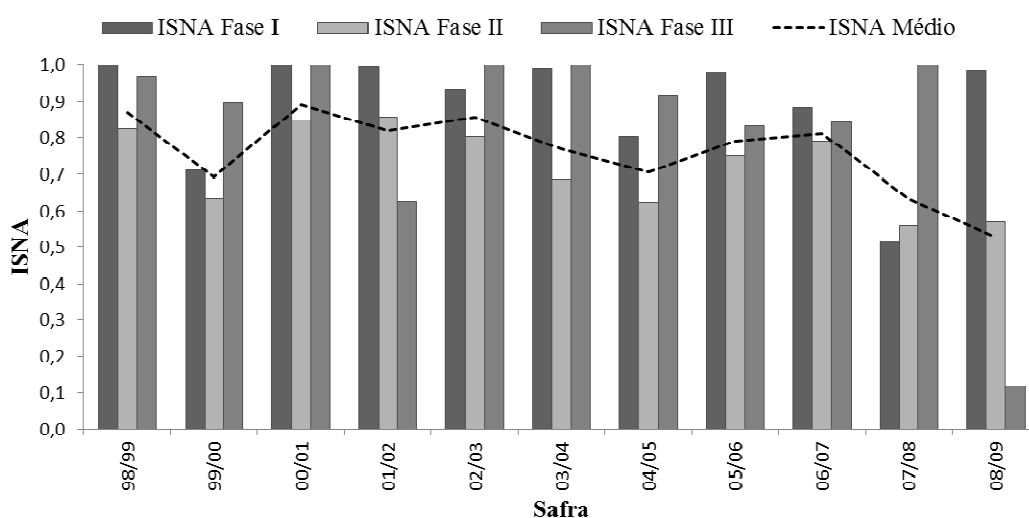
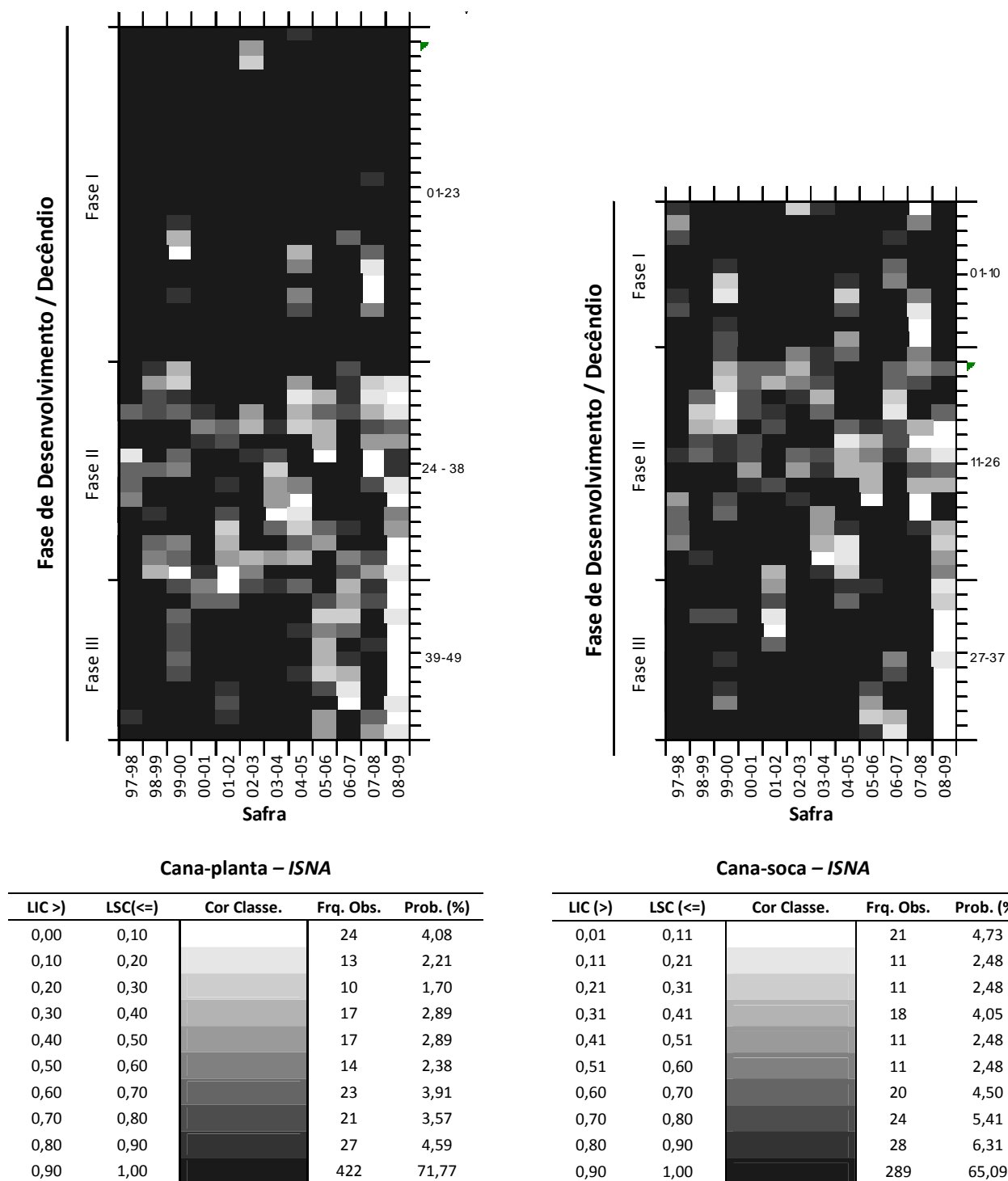


Figura 2.8 – Índice de Satisfação das Necessidades de Água (*ISNA*), considerando as fases de desenvolvimento da cultura da cana de açúcar, ciclo **cana-soca**, nas safras 1997/98 a 2008/09, em Paranavaí-PR.

Embora as Figuras 2.7 e 2.8 evidenciem, na média por ciclo e considerando as fases de desenvolvimento, poucas safras contendo valores de *ISNA* inferior a 0,6, é interessante observar que intervalos mais curtos, podem apresentar valores de *ISNA* bem restritivos ao desenvolvimento da cultura. Analisando-se a Figura 2.9, que contém a distribuição de frequência decendial dos *ISNAs* para cultura da cana-planta e cana-soca, nas safras 1997/98 a 2008/09, pode-se constatar que:

- O ciclo da cana-soca, na fase de desenvolvimento I, apresentou 89,2% de *ISNAs* superiores a 0,62, valor inferior ao apresentado pelo ciclo cana-planta ($\approx 96,0\%$ *ISNAs* $> 0,62$) (Figura 2.9). Provavelmente, o resultado obtido se deve às épocas de plantios e duração da fase de desenvolvimento (Tabela 2.1), que é distinto para os ciclos de cana-planta (duração 231 dias, abril a novembro) e cana-soca (duração 93 dias, junho a outubro). A cana-soca tem seu desenvolvimento inicial limitado à estação do inverno e início da primavera;
- Para a fase de desenvolvimento II, verificou-se que o ciclo cana-planta ($\approx 66,7\%$ *ISNAs* $> 0,62$) apresentou maiores restrições ao desenvolvimento que o ciclo cana-soca ($\approx 72,4\%$ *ISNAs* $> 0,62$) (Figura 2.9), evidenciando que o período de ocorrência da fase de desenvolvimento II (145 dias, novembro a abril) da cana-planta proporcionou menor suprimento hídrico que o verificado para cana-soca (160 dias, outubro a março) (Tabela 2.1);
- O período de ocorrência da fase de desenvolvimento III é semelhante para os ciclos de cana-planta e cana-soca (Tabela 2.1). Como consequência da similaridade da duração e época de ocorrência dos períodos, os *ISNAs* satisfatórios (*ISNAs* $> 0,62$) diferiram em apenas 5,2% (cana-planta $\approx 79,6\%$ e cana-soca $\approx 84,8\%$).

Quanto à caracterização agroclimática, verificou-se em Paranavaí-PR, para o período analisado (1997 a 2009) que a deficiência hídrica (*Def*) acumulada ao longo das safras para cana-planta variou entre 74,3 a 696,1 mm safra⁻¹, nas safras 2000/01 e 2008/09, respectivamente, com média de 305,9 mm safra⁻¹. Para a cana-soca, a deficiência variou entre 112,7 e 595,4 mm safra⁻¹ (safras 1997/98 e 2008/2009), com média de 299,9 mm safra⁻¹, apresentando risco de geadas menor que 20% e temperatura média anual de 22,9°C. O Índice de Satisfação das Necessidades de Água (*ISNA*) médio foi de 0,80 para cana-planta e 0,76 para cana-soca. Baseando-se nessas informações, considerando a metodologia proposta por EMBRAPA (2009), verificou-se que Paranavaí-PR possui baixo risco agroclimático, apresentando classificação “Indicada” (B), tendo como ressalva a irrigação de salvamento na fase de desenvolvimento II (crescimento em estatura), para os ciclos de cana-planta e cana-soca.



Sendo: LIC – limite inferior da classe; LSC – limite superior da classe; Cor Classe – cor da classe apresentada no diagrama de distribuição de frequência em cores; Frq. Obs. – frequência observada em cada classe; Prob. (%) – probabilidade observada encontrada para cada classe (%).

Figura 2.9 – Distribuição de frequência decennial dos Índices de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA), para cultura da cana-planta e cana-soca, nas safras 1997/98 a 2008/09, em Paranavaí-PR.

2.3.7 Estimativa da demanda de irrigação complementar

Para as safras estudadas (1997/98 a 2008/09), considerando os ciclos de cana-planta e cana-soca, foi possível observar que todas as safras compreendidas no período demandaram irrigação complementar, em pelo menos uma fase de desenvolvimento (Tabelas 2.8 e 2.9). A cana-planta demandou valores superiores de irrigação complementar em relação à cana-soca (Tabela 2.8), fato que pode ser explicado pela arquitetura do sistema radicular, posto que recomendações de Vasconcelos & Garcia (2005) consideram que o sistema radicular da cana-planta explora principalmente as camadas superficiais do solo, se comparada à cana-soca, que apresenta incremento na exploração de camadas mais profundas. A menor distribuição do sistema radicular em profundidade afeta diretamente os valores de *CAD* (Capacidade de água disponível), diminuindo o intervalo hídrico disponível à planta e proporcionando maior número de irrigações para manutenção do armazenamento hídrica adequado à planta. Por esse motivo, a cana-planta demandou maior número de irrigações por safra em relação à cana-soca (Tabela 2.9).

A fase de desenvolvimento II para os ciclos de cana-planta e cana-soca foram os períodos que apresentaram maior necessidade de irrigação complementar (Tabela 2.8). Na fase II as plantas apresentaram o período de maior desenvolvimento, necessitando de maior quantidade de água para a realização de troca de gases com a atmosfera (Ramesh, 2000; Inman-Bamber & Smith, 2005). Os ciclos cana-planta e cana-soca apresentaram valores médios similares de irrigação complementar na fase de desenvolvimento II, sendo 367,3 e 368,8 mm fase⁻¹, respectivamente. A lâmina total de irrigação variou entre 218,7 e 848,9 mm safra⁻¹, com média de 508,8 mm safra⁻¹ para cana-planta e 486,5 mm safra⁻¹ para cana-soca.

Tabela 2.8. Lâmina de irrigação estimada no balanço hídrico, considerando as fases de desenvolvimento da cultura da cana-soca e cana-planta, nas safras 1997/98 à 2008/09, em Paranavaí-PR.

Fase	----- Lâmina de irrigação estimada nas safras (mm período ⁻¹) -----											
	97-98	98-99	99-00	00-01	01-02	02-03	03-04	04-05	05-06	06-07	07-08	08-09
Ciclo cana-planta												
I	43,1	0,0	88,3	0,0	43,7	88,1	0,0	87,6	43,3	85,9	174,4	44,0
II	267,4	313,4	403,8	218,7	409,7	314,9	372,0	462,0	317,5	232,3	498,9	597,4
III	61,2	0,0	62,7	0,0	123,8	0,0	0,0	69,2	184,7	185,5	126,0	185,9
Total	371,6	313,4	554,8	218,7	577,2	403,0	372,0	618,9	545,6	503,8	799,3	827,3
Ciclo cana-soca												
I	42,8	0,0	88,4	0,0	43,6	0,0	0,0	44,3	43,3	42,6	86,2	87,4
II	191,5	316,1	449,4	258,2	320,9	316,9	519,1	445,5	328,0	321,0	445,4	514,3
III	0,0	0,0	124,5	0,0	189,3	0,0	0,0	61,6	187,3	123,8	0,0	247,2
Total	234,2	316,1	662,2	258,2	553,8	316,9	519,1	551,3	558,6	487,3	531,6	848,9

Tabela 2.9. Número de irrigações estimadas no balanço hídrico, considerando as fases de desenvolvimento da cultura da cana-soca e cana-planta, nas safras 1997/98 à 2008/09, em Paranavaí-PR.

Fase	Número de irrigações estimadas nas safras (mm período ⁻¹)											
	97-98	98-99	99-00	00-01	01-02	02-03	03-04	04-05	05-06	06-07	07-08	08-09
Ciclo cana-planta												
I	1	0	2	0	1	2	0	2	1	2	4	1
II	6	7	9	5	9	7	8	10	7	5	11	13
III	1	0	1	0	2	0	0	1	3	3	2	3
Total	8	7	12	5	12	9	8	13	11	10	17	17
Ciclo cana-soca												
I	2	2	3	0	1	1	0	2	1	1	2	2
II	8	4	5	3	7	4	7	7	4	4	6	8
III	2	0	2	0	2	2	0	2	2	3	5	2
Total	12	6	10	3	10	7	7	11	7	8	13	12

A maior frequência de irrigações ocorreu na fase de desenvolvimento II, indicando maior atenção quanto às práticas irrigacionistas nesse período (Tabela 2.9). A cana-planta demandou maior frequência de irrigações em relação à cana-soca, devido ao menor valor da *CAD* no ciclo. A fase de desenvolvimento II, em relação às fases de desenvolvimento I e III, também apresentou maior frequência de irrigações, devido à magnitude dos valores de evapotranspiração da cultura (*ETc*), que sempre são maiores nessa fase de desenvolvimento da cultura (Tabela 2.7).

2.4 CONCLUSÃO

Com as análises realizadas no presente trabalho, concluiu-se para localidade de Paranavaí-PR que:

- O *ISNA* médio das safras analisadas não evidencia fatores restritivos ao desenvolvimento da cana-de-açúcar nos ciclos de cana-planta e cana-soca;
- A deficiência hídrica foi o fator de maior importância na classificação agroclimática de risco para o cultivo da cana-de-açúcar para os ciclos de cana-planta e cana-soca;
- Paranavaí-PR é apta ao cultivo de cana-de-açúcar para os ciclos da cana-planta e cana-soca, mas o período de maior crescimento da cultura (fase de desenvolvimento II) necessita de irrigação de salvamento;
- A irrigação complementar média necessária em Paranavaí-PR é de 508,8 mm safra⁻¹ para cana-planta e 486,5 mm safra⁻¹ para cana-soca, com maior frequência de irrigações na fase de desenvolvimento II.

2.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. & SMITH, M. Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. 300p.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. & SMITH, J. Evapotranspiration del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO, 2006. 330 p. (Estudio Riego e Drenaje Paper, 56).
- ARAYA, A.; KEESSTRA, S. D. & STROOSNIJDER, L. A new agro-climatic classification for crop suitability zoning in northern semi-arid Ethiopia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150.1057 – 1064p, 2010.
- BRITO, A. D.; LIBARDI, P. L. & GHIRBERTO, P. J. Componentes do balanço de água no solo com cana-de-açúcar , com e sem adubação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, p. 295-303, 2009.
- BUSO, P. H.; KOEHLER, H. S.; ZAMBON, J. L.; IDO, O. T.; BESPALHOK-FILHO, J. C.; WEBER, H.; OLIVEIRA, R. A. & ZENI NETO, H. O sistema radicular da variedade RB855536 de cana-de-açúcar no plantio em minitolete e tolete. *Scientia Agraria*, v. 10, n. 5, p. 343-349, 2009.
- CARRANZA, C. D.; BAUTISTA, F.; LANZA, R. O. & HERNÁNDEZ, H. R. Classification and agroclimatic zoning using the relationship between precipitation and evapotranspiration in the state of Yucatán, Mexico. *Investigaciones Geográficas*, v. 75, p. 51-60, 2011.
- CRUZ, A. C.; LIBARDI, P. L.; CARVALHO, L. A. & ROCHA, G. C. Balanço de água no volume de solo explorado pelo sistema radicular de uma planta de citros. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, n. 4, p. 1-10, 2005.
- DANTAS NETO, J.; FIGUEREDO, J. L.; FARIAS, C. H.; AZEVEDO, H. M. & AZEVEDO, C. A. Resposta da cana-de-açúcar , primeira soca , a níveis de irrigação e adubação de cobertura. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, v. 10, n. 2, p. 283-288, 2006.
- DIAS, F. L.; MAZZA, J. A.; MATSUOKA, S.; PERECIN, D. & MAULE, R. F. Produtividade da cana-de-açúcar em relação a clima e solos da região noroeste do estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 23, p. 627-634, 1999.

- DOORENBOS, J. & KASSAM, A. H. Yield response to water. Rome, FAO, 1979. 197p. (Irrigation and Drainage Paper, 33)
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa CNPS, 1997.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, 1999. 412 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar. In: Manzatto, C.V. Embrapa Solos, Rio de Janeiro-RJ, 2009. 55p.
- FARIAS, C. H.; FERNANDES, P. D.; AZEVEDO, H. M. & NETO, J. D. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 12, n. 83, p. 356-362, 2008.
- GARCIA, M.; RAES, D.; JACOBSEN, S.E. & MICHEL, T. Agroclimatic constraints for rainfed agriculture in the Bolivian Altiplano. Journal of Arid Environments, v. 71, n. 1, p. 109-121, 2007.
- IDO, O. T.; DAROS, E.; ZAMBON, J. L.; WEBER, H.; BUSO, P. H. M. & OLIVEIRA, R. A. Crescimento e distribuição radicial de três cultivares de cana-de-açúcar, em cana soca, em dois tipos de solo, em rizotron. Scientia Agraria, v. 7, n.1-2, p. 21-26, 2006.
- INMAN-BAMBER, N. G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. Field Crops Research. v. 89, p. 107-122, 2004.
- INMAN-BAMBER, N. G. & SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. Field Crops Research, v. 92, p. 185-202, 2005.
- INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ - IAPAR. Cartas climáticas do estado do Paraná. Londrina, 1994, 49 p.
- MACHADO, E. C.; PEREIRA, A. R.; FAHL, J. I.; ARRUDA, J. V. & CIONE, J. Índices biométricos de duas cultivares de cana-de-açúcar. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 17, n. 9, p.1323-1329, 1982.

- MACHADO, R. S.; RIBEIRO, R. V.; EDUARDO, P. & MARCHIORI, R. Respostas biométricas e fisiológicas ao deficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 44, n. 12, p. 1575-1582, 2009.
- OLIVEIRA, E. C.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, A. C.; NETO, D. E. S.; ROCHA, A. T. & CARVALHO, L. A. Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana de açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. *Pesq. agropec. bras.*, v. 46, n. 6, p. 617-625, 2011.
- PREVEDELLO, C. L. Programa SPLINTEX para estimar a curva de retenção de água a partir da granulometria (composição) do solo – Versão 1.0. 1999.
- RAMESH, P. Effect of Different Levels of Drought during the Formative Phase on Growth Parameters and its Relationship with Dry Matter Accumulation in Sugarcane. *J. Agronomy & Crop Science*, v. 185, p. 7, 2000.
- RAMIREZ, R. G.; TRUJILLO, T. R.; RUIZ, J. S. & ORDONEZ, Y. F. Aptitud agroclimática em la Mesa Central de Guanajuato, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín*, n. 54, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 24–35, 2004.
- RIJTEMA, P.E.; ABOUKHALED, A. Crop water use. In: ABOUKHALED, A.; ARAR, A., BALBA, A.M.; BISHAY, B.G.; KADRY, L.T.; RIJTEMA, P.E. & TAHER, A. Research on crop water use, salt affected soils and drainage in the Arab Republic of Egypt. *FAO Regional Office for the Near East*, 1975. p.5-61.
- SECRETARIA DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO DO PARANÁ - SEAB. Estimativa de safra. Disponível em: <www.seab.pr.gov.br> Acesso em: 22/03/2012
- SILVA, D. K.; DAROS, E.; ZAMBON, J. L. C.; WEBER, H.; IDO, O. T.; ZUFFELLATO-RIBAS, K. C.; KOEHLER, H. S. & OLIVEIRA, R. A. Análise de crescimento em cultivares de cana-de-açúcar em cana-soca no noroeste do Paraná na safra de 2002 / 2003. *Scientia Agraria*, v. 6, n. 1-2, p. 47-53, 2005.
- SILVA, F. C. & BERGAMASCO, A. F. Levantamento de modelos matemáticos descritos para a cultura da cana-de- açúcar. *Rev. Biociênc. Taubaté*, v. 7, n. 1, p. 7-14, 2001.
- SILVA, M. A.; JERONIMO, E. M. & LUCIO, A. D. Perfilamento e produtividade de cana-de-açúcar com diferentes alturas de corte e épocas de colheita. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. v. 43, n. 8, p. 979-986, 2008.

- SMITH, D. M.; INMAN-BAMBER, N. G. & THORBURN, P. J. Growth and function of the sugarcane root system. *Field Crops Research*, v. 92, p. 169-183, 2005.
- SINCLAIR, T. R.; GILBERT, R. A.; PERDOMO, R. E.; SHINE Jr., J. M.; POWELL, G. & MONTES, G. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. *Field Crops Research*, v.88, p.171-178, 2004
- SINGELS, A.; VAN DEN BERG, M.; SMIT, M. A.; JONES, M. R. & VAN ANTWERPEN, R. Modeling water uptake, growth and sucrose accumulation of sugarcane subjected to water stress. *Field Crops Research*, v. 117, n. 1, p. 59-69, 2010.
- SOUZA, J. L. M. Programa MORETTI – Módulo: Balanço hídrico seqüencial (periodicidade: 1, 5, 7, 10, 15 e 30 dias), versão 1.0. Curitiba: DSEA/SCA/UFPR, 2008 (Programa computacional).
- THORNTHWAITE, C. W. & MATHER, J. R. The water balance. Drexel Institute of Technology – Laboratory of Climatology, Publications in Climatology, Centerton, N.J. v. 8, n. 1, 104p., 1955.
- VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.
- VASCONCELOS, A. C. & GARCIA, J. C. Cana-de-açúcar: ambientes de produção - desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar. *Informações Agronômicas*, v. 110, p. 1-5, 2005.
- VITTI, G. C. & MAZZA, J. A. Planejamento, estratégias de manejo e nutrição da cultura de cana-de-açúcar. *Informações Agronômicas*, v. 97, p. 1-16, 2002.
- WREGE, M. S.; CARAMORI, P. H.; CARLOS, GONÇALVES, A.; BERTONHA, A.; FERREIRA, R. C.; CAVIGLIONE, J. H.; FARIA, R. T. & LOURENÇO, P. S. Regiões potenciais para cultivo da cana-de-açúcar no Paraná, com base na análise do risco de geadas. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 13, n. 1, p. 113-122, 2005.
- WIEDENFELD, R. P. Water stress during different sugarcane growth periods on yield and response to N fertilizer. *Agricultural Water Management*, v.43 p.173–182, 2000.

CAPÍTULO 3 – AJUSTE DE MODELOS DE PRODUÇÃO ÁGUA-CULTURA PARA CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum spp.*) EM PARANAVAÍ-PR.

Autor: Eng. Agr. Emerson Gerstemberger

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza

RESUMO: Por ser uma cultura de ciclo semi-perene, a cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) está susceptível as influências climáticas ao longo do ciclo, afetando diretamente a produtividade das safras. Nesse sentido, as previsões de safra a partir de modelos de simulação de culturas, podem ser utilizadas com grande êxito em diversas situações. O presente estudo teve por objetivo avaliar as relações hídricas e o desempenho de modelos de produção água-cultura na estimativa da produtividade da cana-soca em Paranavaí, Paraná. Os dados de produtividade da cana-de-açúcar foram disponibilizados pela PMGCA/UFPR/RIDESA, Universidade Federal do Paraná, e compreenderam as safras 1997/98 a 2007/08 (9 safras) de cana-soca. Os dados meteorológicos diários foram fornecidos pelo Instituto Meteorológico do Paraná (SIMEPAR). A evapotranspiração de referência foi estimada com o método de Penman-Monteith, parametrizado pela FAO. Os valores de evapotranspiração da cultura (ET_c), armazenamento da água no solo (Arm), evapotranspiração real (ER), deficiência (Def) e excedente (Exc) hídrico, foram estimados com balanço hídrico diário, baseando-se na metodologia de Thornthwaite & Mather. As análises de regressão entre produtividade real e dados climáticos (ET_o , ET_c , ER , ER/ET_c , P), com modelos simplificados, resultou em baixos coeficientes de determinação ($R^2 < 0,39$). Os modelos água-cultura empregando coeficientes ou fatores de penalização da produtividade por déficit (k_y , k_{yi} e λ), obtidos na bibliografia, possibilitaram estimativas de produtividade classificados entre “péssimo” e “mau” nas análises. O ajuste estatístico de k_y , k_{yi} e λ com análise de regressão múltipla possibilitou que os modelos de “Stewart et al., proposto por Doorenbos & Kassan” e “Jensen” obtivessem estimativas de produtividade classificados como “ótimo”, evidenciando que os mesmos são adequados para serem utilizados em atividades de planejamento da atividade agrícola da cana-soca em Paranavaí-PR.

Palavras-chave: Relações hídricas, produtividades, modelos, simulação.

CHAPTER 3 – ADJUSTMENT OF PRODUCTION MODELS WATER-CULTURE FOR SUGARCANE (*Saccharum spp.*) IN PARANAVAÍ-PR.

Author: Eng. Agr. Emerson Gerstemberger

Advisor: Teach. Doc. Jorge Luiz Moretti de Souza

ABSTRACT: Being a semi-perennial crop cycle, the sugarcane (*Saccharum spp*) is influenced by the weather over the crops, directly affecting their productivity. In this sense, the predictions from models can be used successfully in various situations. The present study aimed to evaluate the performance of production water-culture models to estimate productivity of first ratoon cane in Paranavaí, Paraná. Productivity data of sugarcane were provided by PMGCA/UFPR/RIDESA, Federal University of Parana, and included crops 1997/98 to 2007/08 (9 cycles) of first ratoon cane. Daily meteorological data were provided by the Meteorological Institute of Paraná (SIMEPAR). The reference evapotranspiration was estimated with the Penman-Monteith method, parameterized by FAO. The values of crop evapotranspiration (ET_c), soil water storage (Arm), actual evapotranspiration (ER), deficiency (Def) and water surplus (Exc), were estimated with a daily water balance model, based the methodology of Thornthwaite & Mather. Regression analysis between actual productivity and climatic data (ET_o , ET_c , ER , ER , ET_c , P), with simplified models, resulting in low coefficient of determination ($R^2 < 0.39$). The water-culture models using coefficients or penalty factors of productivity deficit (k_y , k_{yi} and λ) obtained in the literature, allowed estimates of productivity classified between "very bad" and "bad" in the analyzes. The statistical fit of k_y , k_{yi} and λ with multiple regression analysis enabled the models "Stewart et al. proposed by Doorenbos & Kassan" and "Jensen" to obtain estimates of productivity classified as "great", showing that they are suitable for use in farming planning activities of first ratoon cane in Paranavaí-PR.

Key-words: Water relations, yields, models, simulation.

3.1 INTRODUÇÃO

Dentre as atividades econômicas, a agricultura é a que apresenta maior dependência das condições meteorológicas, que são responsáveis pelas oscilações das safras agrícolas em todo país (Moraes, 1998). A cana-de-açúcar é um dos principais produtos do agronegócio brasileiro e a área plantada no Estado do Paraná, principalmente na região de Paranavaí, está em plena expansão (SEAB, 2012).

As relações entre os parâmetros climáticos e a produção agrícola são bastante complexas, pois os fatores ambientais afetam diretamente o crescimento e o desenvolvimento das plantas. A influência do clima sobre a cultura da cana-de-açúcar é marcante por se tratar de um cultivo semi-perene, cultivado em diferentes condições ambientais, ocasionando variações de produção ao longo dos anos (Silva, 2008).

O efeito do estresse hídrico sobre a cana-de-açúcar, nas diferentes fases de seu desenvolvimento, não se encontra bem definido na literatura, prejudicando as estimativas de como as colheitas serão afetadas quando a umidade do solo se encontrar acima ou abaixo de valores ótimos (Wiedenfeld, 2000). No entanto, sabe-se que o dano promovido pelo estresse depende da fase de desenvolvimento em que a planta se encontra e da duração do estresse. Quanto maior o período com baixa disponibilidade hídrica, maiores serão os danos sobre a produtividade de colmos e sacarose (Inman-Bamber, 2004; Farias et al., 2008).

No manejo da cana-de-açúcar é sempre importante prever o comportamento da cultura em produção frente às alterações que ocorrem no solo e no clima, ao longo do ciclo produtivo (Silva & Bergamasco, 2001). O conhecimento detalhado da dinâmica da água, durante o desenvolvimento da cultura fornece elementos essenciais ao estabelecimento ou aprimoramento de práticas de manejo agrícola, que visam otimização da produtividade (Cruz et al., 2005).

Para melhor entendimento da interação planta-clima, modelos água-cultura têm sido utilizados para caracterizar os efeitos das variações térmicas e pluviais sobre a produtividade dos cultivos (Moraes, 1998). Previsões de safra e outras estimativas envolvendo culturas agrícolas podem ser utilizadas com êxito em diversas situações, a partir de modelos de simulação (Andrade Junior et al., 2006).

Hoogenboom (2000) comenta que a utilização de modelos, pode ter aplicações tanto previamente à semeadura, como durante o crescimento e desenvolvimento da cultura. A

informação obtida pode ser usada em propriedades rurais ou instituições governamentais, para planejamento de políticas agrícolas.

A informatização de processos de suporte às decisões, em especial pelo emprego de modelos matemáticos, pode minimizar riscos ambientais, reduzir custos de produção e proporcionar maior sustentabilidade ao planejamento agrícola. O uso de modelos tem contribuído para melhorar o conhecimento dos mecanismos fisiológicos das culturas. Porém, de acordo com Berlato (1987), para que um modelo seja utilizado em condições diferentes daquela em que foi desenvolvido, é necessário que seus parâmetros sejam testados e ajustados localmente, sendo sua aplicação dependente dos resultados obtidos.

No presente estudo, teve-se por objetivo avaliar as relações hídricas e o desempenho de funções simplificadas (linear, potencial, exponencial e logarítmica) e modelos água-cultura, na estimativa da produtividade da cana-soca, nas condições de solo e clima do município de Paranavaí, localizado na região Noroeste do Estado do Paraná.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Caracterização do local

A avaliação dos modelos de produção água-cultura e as estimativas de produtividade para cana-soca foram realizadas em solos cultivados com cana-de-açúcar, em um experimento realizado entre 1997/98 e 2007/08, em que foram totalizados nove ciclos produtivos para a cana-soca (Tabela 3.1). A cultivar analisada no presente estudo foi a RB72454, com ciclo médio para cana-soca de 365 dias. Para todos os anos estudados, as colheitas foram realizadas no mês de julho, com ciclos de 12 meses. O experimento foi conduzido na Estação Experimental da Universidade Federal do Paraná, situada no município de Paranavaí - Paraná, Brasil, localizada nas coordenadas geográficas de 22°58'44'' de latitude Sul, 52°27'51'' de longitude Oeste e altitude média de 480 m (Figura 3.1). O local possui relevo suave ondulado e LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (Silva et al., 2005).

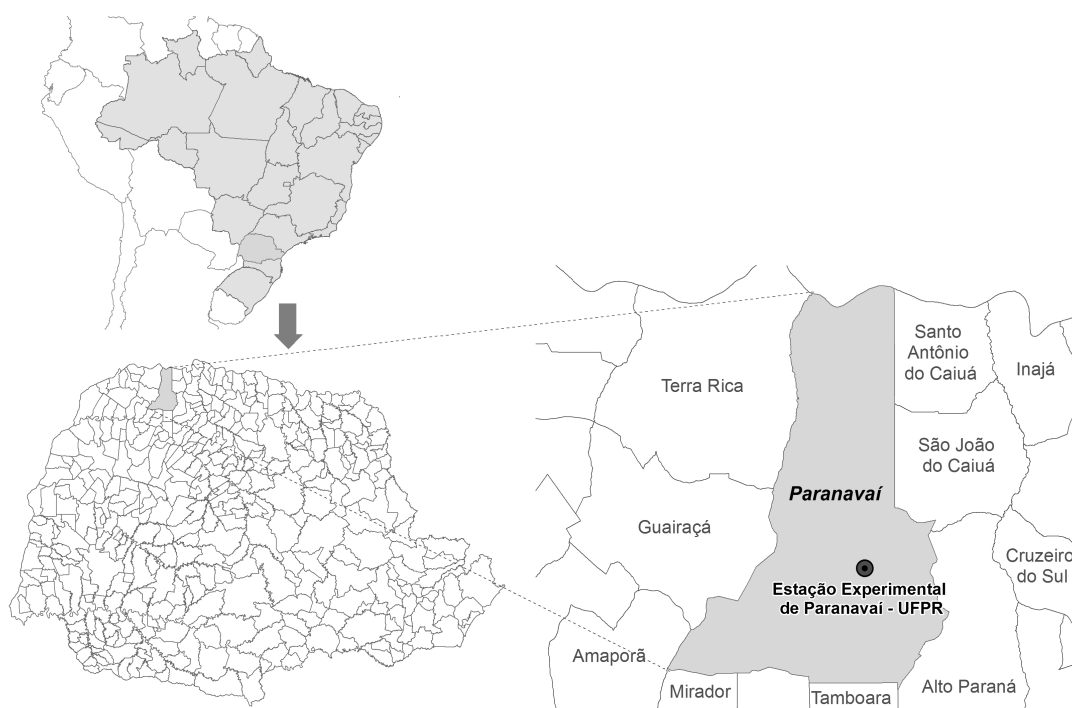


Figura 3.1 – Localização da Estação Experimental da Universidade Federal do Paraná, Paranavaí - Paraná, Brasil.

Tabela 3.1. Produtividade média da cana-de-açúcar, em primeira soca, obtidas nas safras 1997/98 a 2007/2008, na Estação Experimental da Universidade Federal do Paraná, Paranavaí-PR.

Safra	Cultivar	Produtividade (ton ha ⁻¹)
1997/98	RB72454	130,60
1998/99	RB72454	130,16
1999/00	RB72454	98,99
2000/01	RB72454	140,83
2001/02	RB72454	127,94
2002/03	RB72454	115,79
2003/04	RB72454	141,60
2005/06	RB72454	154,19
2007/08	RB72454	67,92

Fonte: PMGCA/UFPR/RIDESA (2011)

3.2.1.1 Tratos culturais

O preparo do solo foi realizado iniciando-se com duas gradagens, sendo a primeira realizada com grade aradora e a segunda com grade niveladora. Posteriormente, foi realizado o sulcamento para o plantio dos toletes, sendo este executado manualmente (convencional), onde os colmos foram distribuídos dentro das linhas de plantio (sulcos) dispostas em 18 gemas por metro linear com espaçamento de 1,40m entre linhas. A adubação de base utilizada foi 20 kg ha⁻¹ de N, 100 kg ha⁻¹ de K₂O e 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅. As colheitas foram realizadas manualmente, utilizando-se da queima da palhada na pré-colheita, com o intuito de remover o excesso da mesma e facilitar a colheita.

3.2.2 Modelos utilizados para estimar a produtividade

A estimativa da produtividade da cultura da cana-de-açúcar foi realizada com quatro funções simplificadas (linear, potencial, exponencial e logarítmica) e seis modelos água-cultura específicos, para a região de Paranavaí-PR. As análises de regressão e correlação com as quatro funções simplificadas, visando verificar o ajustamento da produtividade real com dados meteorológicos (*ET_o*, *ET_c*, *ER*, *ER/ET_c* e *P*), foram obtidas com o auxílio de uma planilha eletrônica. Conforme recomendações e sugestões apontadas por Moraes et al., (1998) e Frizzzone et al. (2005), foram selecionados os seguintes modelos água-cultura para a análise de regressão e correlação realizada entre os valores medidos e estimados de produtividade:

- Howell & Hiler (1975):
- $$\frac{Y_r}{Y_p} = \frac{\sum_{i=1}^n (ER)_i}{\sum_{i=1}^n (ET_c)_i}$$
- Jensen (1968):
- $$\frac{Y_r}{Y_p} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{ER}{ET_c} \right)_i^{\lambda_i}$$
- Minhas, Parikh & Srinivasan (1974):
- $$\frac{Y_r}{Y_p} = \prod_{i=1}^n \left[1 - \left(1 - \frac{ER}{ET_c} \right)_i^2 \right]^{\lambda_i}$$
- Doorenbos & Kassan (1979):
- $$\frac{Y_r}{Y_p} = 1 - \left[ky \cdot \left(1 - \frac{ER}{ET_c} \right) \right]$$
- Stewart, Hagan & Pruitt proposto por Doorenbos & Kassan (1979):
- $$\frac{Y_r}{Y_p} = 1 - \left[\sum_{i=1}^n ky_i \cdot \left(1 - \frac{ER}{ET_c} \right)_i \right]$$
- Rao, Sarma & Chander (1988):
- $$\frac{Y_r}{Y_p} = \prod_{i=1}^n \left[1 - ky_i \cdot \left(1 - \frac{ER}{ET_c} \right)_i \right]$$

Sendo: Y_r – produtividade estimada da cultura da cana-de-açúcar (kg ha^{-1}); Y_p – produtividade potencial da cultura da cana-de-açúcar na região (kg ha^{-1}); ER_i – evapotranspiração real da cultura na i -ésima fase de desenvolvimento (mm ciclo^{-1}); ET_{ci} – evapotranspiração da cultura na i -ésima fase de desenvolvimento (mm ciclo^{-1}); ky ou ky_i – coeficientes de penalização da produtividade por déficit para as diferentes fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar (adimensional); λ_i – fator hídrico de penalização da produtividade por déficit para as diferentes fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar (adimensional); i – fases de desenvolvimento da cultura; n – número de fases de desenvolvimento.

3.2.3 Fenologia da Cana-de-açúcar

As fases de desenvolvimento e a duração dos subperíodos para cana-de-açúcar foram adaptados de Machado et al. (1982), Sinclair et al. (2004), Silva et al. (2005) (Tabela 3.2). A profundidade efetiva do sistema radicular foi definida conforme as recomendações de Ido et al. (2006). Os valores de kc utilizados para transformar a ET_o em evapotranspiração da

cultura (ET_c) foram ajustados para o período baseando-se nos valores apresentados por Doorenbos & Kassam (1979).

Tabela 3.2. Fases de desenvolvimento, profundidade efetiva do sistema radicular (z) e coeficientes de cultivo (kc) da cultura da cana-de-açúcar, ciclo cana-soca.

Fase de desenvolvimento	Início da fase	Fim da fase	Duração da fase (dias)	Profundidade – z (cm)	kc (ad.)
I	Julho	Outubro	93	60	0,4
II	Outubro	Março	160	80	1,25
III	Março	Julho	112	80	0,75

I: brotação a intenso perfilhamento; II: crescimento em estatura; III: diminuição crescimento e acúmulo de sacarose. Fonte: adaptado de Machado et al. (1982); Ido (2006); Sinclair et al. (2004); Silva et al. (2005).

3.2.4 Parâmetros de entrada nos modelos água-cultura

Os modelos água-cultura utilizados para realizar a estimativa da produtividade da cana-de-açúcar possuem uma série de variáveis, coeficientes ou fatores de entrada. As principais são: produtividade potencial (Y_p), evapotranspiração real (ER), evapotranspiração da cultura (ET_c), fatores hídricos em função da fase de desenvolvimento da cultura (λ) e coeficiente de penalização da produtividade por déficit hídrico (ky).

Os itens dispostos a seguir fazem algumas considerações sobre os procedimentos realizados para a obtenção das principais variáveis, fatores ou coeficientes necessários nos modelos água-cultura.

3.2.5 Produtividade potencial (Y_p)

Considerou-se como produtividade potencial (Y_p) a maior produtividade obtida durante o período analisado para a cultivar RB72454, no local do experimento. Os dados experimentais fornecidos pela PMGCA/UFPR/RIDESIA indicaram a ocorrência de uma produtividade de $154,19 \text{ ton ha}^{-1}$, obtida na safra 2005/06.

3.2.6 Balanço hídrico local para estimativa da ET_c e ER

A estimativa das componentes do balanço hídrico (evapotranspiração da cultura, armazenamento, evapotranspiração real, deficiência, excedente) foi obtida com auxílio de um programa denominado “MORETTI – Módulo: Balanço hídrico sequencial (Periodicidade: 1, 5, 7, 10 15 e 30 dias), Versão 1.0” Souza (2008). O balanço hídrico desenvolvido por Souza (2008) baseou-se na metodologia proposta por Thornthwaite & Mather (1955). Consiste em um balanço hídrico sequencial, sendo necessários os seguintes dados de entrada: precipitação pluvial diária (P); evapotranspiração de referência diária (ET_o); coeficiente de cultivo (kc) da

cultura de cana-de-açúcar, em suas várias fases de desenvolvimento, para transformar ET_o em ET_c ; capacidade de água disponível (CAD); e, fração de água disponível (p) da cultura de cana-de-açúcar, em suas várias fases de desenvolvimento, para calcular a água disponível no solo (AD). Como saída, o balanço hídrico estima os valores diários de armazenamento da água no solo (Arm), evapotranspiração real (ER), deficiência hídrica (Def) e excedente hídrico (Exc).

Todas as análises de simulação dos balanços hídricos foram realizadas no Laboratório de Modelagem de Sistemas Agrícolas (LAMOSA)/DSEA/SCA/UFPR, em Curitiba, Paraná.

3.2.7 Precipitação pluvial (P) e evapotranspiração de referência (ET_o)

A precipitação e demais dados climáticos necessários para estimar a ET_o (radiação solar, temperatura do ar, umidade atmosférica, velocidade do vento) foram fornecidos pelo Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR). Foram analisadas as séries de dados climáticos disponíveis na região de Paranaíba (14 anos), coletadas na estação climatológica automática. A tabulação e organização dos dados fornecidos foram processadas em planilha eletrônica.

As falhas de leitura foram preenchidas de acordo com o número de dias contendo falhas. Para precipitação, o preenchimento foi obtido atribuindo valor de precipitação nulo (sem chuva) para os dias sem dados. Para os demais dados meteorológicos (temperatura máxima e mínima do ar, umidade relativa e velocidade do vento), adotou-se o seguinte critério: intervalos com até dois dias sem dados foram preenchidos com a média do intervalo; para intervalos maiores, os dados foram preenchidos com a média dos demais anos para o mesmo período.

A estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) foi realizada utilizando do método de Penman-Monteith parametrizada pela FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (Allen et al., 1998).

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma_{psy} \cdot \frac{900}{(T + 273)} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma_{psy} \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)}$$

Sendo: ET_o – evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); Δ – declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); R_n – radiação líquida na superfície ($\text{MJ m}^2 \text{ d}^{-1}$); G – balanço do fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$); γ_{psy} – constante psicométrica

(kPa °C⁻¹); T – temperatura média do ar (°C); u_2 – velocidade do vento a dois metros de altura (m s⁻¹); e_s – pressão de saturação de vapor (kPa); e_s – pressão atual do vapor (kPa).

– Radiação solar incidente (R_s)

O valor da radiação solar incidente (R_s), foi estimado com uma equação recomendada por Allen et al. (2006):

$$R_s = Krs \cdot (T_{\max} - T_{\min})^{0,5} \cdot Ra$$

Sendo: R_s – radiação solar incidente (MJ m⁻² dia⁻¹); Krs – coeficiente empírico (°C^{-0,5}), sendo igual a 0,16 para regiões continentais; T_{\max} – temperatura máxima do ar (°C); T_{\min} – temperatura mínima do ar (°C); Ra – radiação solar incidente no topo da atmosfera (MJ m⁻² dia⁻¹).

3.2.8 Atributos físico-hídricos do solo

A determinação dos atributos físico-hídricos do solo (textura, massa específica e umidades na capacidade de campo e ponto de murchamento) foi necessária para permitir o cálculo da capacidade de água disponível no solo (CAD). As amostras deformadas e indeformadas de solo foram coletadas na área experimental em oito pontos de coleta, subdividido em três profundidades (0-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm). As análises foram realizadas no Laboratório de Física do Solo/SCA/UFPR.

A amostragem do solo para determinação da massa específica e pontos da curva de retenção da água no solo foi realizada pelo método do anel volumétrico. As análises seguiram as metodologias descritas por EMBRAPA (1997).

De posse dos parâmetros da curva de retenção da água e da análise granulométrica do solo os parâmetros θ_r , θ_s , α , m e n da equação de Van Genuchten (1980) foram estimados com o programa SPLINTEX versão 1.0 (Prevedello, 1999). As umidade na capacidade de campo e ponto de murchamento permanente foram determinados considerando as tensões de 0,0098 Mpa e 1,470 MPa, respectivamente.

A capacidade de água disponível no solo (CAD) foi determinada por meio da seguinte equação:

$$CAD_i = 0,01 \cdot (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \cdot z_i$$

Sendo: CAD_i – capacidade de água disponível no solo na i -ésima fase de desenvolvimento (mm); θ_{CC} – umidade do solo na capacidade de campo, com base em volume (%); θ_{PMP} –

umidade do solo no ponto de murcha permanente, com base em volume (%); z_i – profundidade efetiva do sistema radicular na i -ésima fase de desenvolvimento (mm).

A FAO (Allen et al., 2006) também apresenta valores típicos de fração p para diversas culturas, indicando o valor de 0,65 para a cultura da cana-de-açúcar, com o qual foi possível calcular a água disponível do solo por meio da seguinte equação:

$$AD_i = CAD_i \cdot p$$

Sendo: AD_i – água disponível no solo na i -ésima fase de desenvolvimento (mm); CAD_i – capacidade de água disponível do solo na i -ésima fase de desenvolvimento (mm); p – fração de água disponível no solo para um determinado tipo de cultura (adimensional).

3.2.9 Armazenamento da água no solo (Arm)

Para o acompanhamento do armazenamento de água no solo e/ou “negativo acumulado”, foi utilizada a equação Cossenoidal, proposta por Rijtema & Aboukhaled (1975). Para o cálculo, o programa utilizado considera as seguintes condições:

Se $CAD(1 - p) < Arm \leq CAD$, ou seja, zona úmida, então

$$Arm = CAD - L$$

Senão, se $0 < Arm \leq CAD(1 - p)$, ou seja, na zona seca, então

$$ARM = (1 - p) \cdot CAD \cdot \left\{ 1 - \frac{2}{\pi} \cdot \arctg \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{|L| - CAD \cdot p}{(1 - p) \cdot CAD} \right) \right] \right\}$$

Sendo: CAD – capacidade de água disponível (mm), Arm – armazenamento de água do solo (mm); L – negativo acumulado no decêndio (mm); p – fração de água disponível no solo para uma determinada cultura (adimensional).

3.2.10 Cálculo da evapotranspiração da cultura (ETc)

Os valores da evapotranspiração da cultura (ETc) foram calculados utilizando a seguinte equação:

$$ETc = ETo \cdot kc$$

Sendo: ETc – evapotranspiração da cultura (mm dia⁻¹); ETo – evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹); kc – coeficiente de cultivo (adimensional).

Foram utilizados os valores de kc recomendados pela FAO (Allen et al., 2006).

3.2.11 Avaliação da estimativa das produtividades com os modelos água-cultura

As análises de estimativa da produtividade com os modelos água-cultura foram realizadas empregando coeficientes ou fatores de penalização da produtividade por déficit para as diferentes fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar: (a) disponibilizados na literatura (Tabela 3.3); e, (b) coeficientes ky , ky_i e fatores λ_i ajustados em análises de regressão linear simples (ky) e múltipla (ky_i e λ_i). As análises foram estabelecidas com as transformadas dos termos que continham o rendimento relativo (Y/Y_m) da cana-de-açúcar e da evapotranspiração relativa (ET_r/ET_c), utilizando os dados climáticos e culturais das nove safras estudadas para Paranavaí-PR. As regressões foram resolvidas com o método dos mínimos quadrados e o sistemas de equações lineares foi solucionado com o método da eliminação de Gauss (Araujo, 2008).

Tabela 3.3. Coeficientes e/ou fatores levantados na literatura, empregados na simulação dos modelos água-cultura.

Coeficiente ou fator	----- Fases -----			Todo o ciclo	Fonte
	I	II	III		
λ	0,43	0,39	0,07	—	Jensen (1968)
ky	0,75	0,5	0,1	—	Doorenbos & Kassan (1979)
ky total	—	—	—	1,2	Doorenbos & Kassan (1979)

As estimativas das produtividades para cada safra estudada foram feitas a partir da inserção dos modelos água-cultura em uma planilha eletrônica. Para isso, foram utilizados: os fatores e coeficientes de penalização da produtividade por déficit para as diferentes fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar (disponíveis na bibliografia ou ajustados); e, os valores de ET_c e ER , obtidos no cálculo do balanço hídrico diário, em cada i -ésima fase de desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar e j -ésima safra na região de Paranavaí-PR.

A precisão da estimativa de cada modelo água-cultura foi determinada a partir de análise de regressão linear e correlação, realizada entre os valores anuais de produtividade real (levantados na região) e estimada com os referidos modelos. Para avaliar o grau de exatidão entre valores de produtividade reais e estimados da cultura da cana-de-açúcar, foi utilizado o índice “ d ” de concordância de Willmott et al. (1985). Adotou-se também o índice “ c ” de Camargo & Sentelhas (1997), que considera: $c > 0,85$ – ótimo, $0,76 \leq c \leq 0,85$ – muito bom, $0,66 \leq c \leq 0,75$ – bom, $0,61 \leq c \leq 0,65$ – mediano, $0,51 \leq c \leq 0,60$ – sofrível, $0,41 \leq c \leq 0,50$ – mau e $c \leq 0,40$ – péssimo. As análises foram realizadas em uma planilha eletrônica.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Produtividade real da cana-soca em Paranavaí-PR

A média regional e médias das produtividades de cana-de-açúcar alcançadas na Estação Experimental de Paranavaí, no período estudado, podem ser observadas na Figura 3.2. A produtividade da safra 2007/08 ($67,92 \text{ ton ha}^{-1}$) foi à menor verificada entre todas as safras analisadas, apresentando produtividade 16,04% inferior à produtividade média da região, sendo a única safra que registrou produtividade abaixo da média regional, no local de estudo e período analisado. A safra 2005/06 apresentou a maior produtividade ($154,19 \text{ ton ha}^{-1}$) e a produtividade da safra 2007/08 foi a que ficou mais próxima da média da região (Tabela 3.1) (SEAB, 2012; PMGCA/UFPR/RIDESA, 2011).

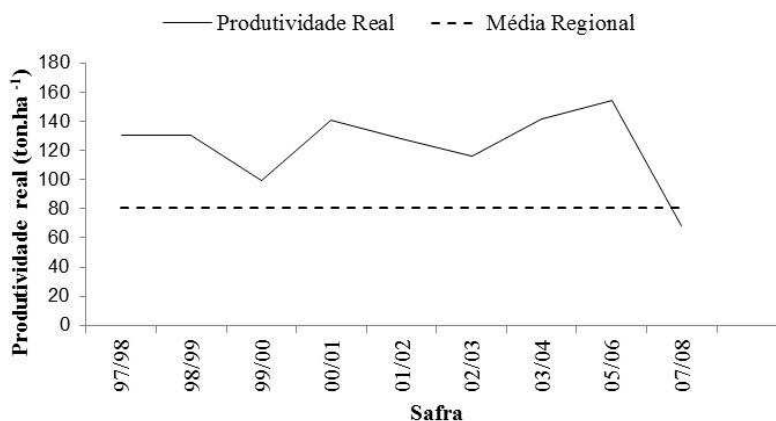


Figura 3.2 – Produtividade média da cana-de-açúcar, ciclo cana-soca, obtidas nas safras 1997/98 a 2007/2008, na Estação Experimental da Universidade Federal do Paraná, Paranavaí-PR, e produtividade média regional.

3.3.2 Parâmetros físico-hídricos do solo da Estação Experimental de Paranavaí-PR

As características físicas do solo evidenciaram que a Estação Experimental de Paranavaí possui solo de textura média com teor de areia entre 82,9% e 84,1%, apresentando uniformidade textural em profundidade (Tabela 3.4). É um solo bastante permeável, homogêneo, sem camadas de impedimento, com massa específica variando entre 1,52 e 1,59 g cm^{-3} . Os valores de CAD foram determinados considerando os parâmetros que se encontram apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.4. Textura (areia, silte e argila), massa específica do solo e umidades da capacidade de campo e ponto de murcha permanente da Estação Experimental da Universidade Federal do Paraná, Paranavaí-PR, em diferentes profundidades.

Profundidade	Areia ----- % -----	Silte ----- % -----	Argila ----- % -----	Massa específica (g cm ⁻³)	θ_{cc} (cm ³ cm ⁻³)	θ_{PMP} (cm ³ cm ⁻³)
0 a 20 cm	83,3	1,1	15,5	1,64	0,10	0,06
20 a 40 cm	82,9	1,0	16,0	1,61	0,22	0,07
40 a 60 cm	84,1	1,3	14,5	1,62	0,21	0,07
60 a 80 cm*	84,1	1,3	14,5	1,62	0,21	0,07

θ_{cc} – umidade do solo na capacidade de campo, com base em volume; θ_{PMP} – umidade do solo no ponto de murcha permanente, com base em volume.*Parâmetros estimados.

Tabela 3.5. Ciclo, profundidade efetiva do sistema radicular (z) e capacidade de água disponível (CAD) do solo da Estação Experimental de Paranavaí-PR, para a cultura da cana-de-açúcar (cana-soca), nas fases de desenvolvimento I, II e III.

Fase de desenvolvimento	Duração da fase (dias)	z (cm)	CAD (mm)
I	93	60	65,3
II	160	80	93,9
III	112	80	93,9

3.3.3 Componentes do balanço hídrico para cana-soca em Paranavaí-PR

Os valores das componentes do balanço hídrico diário sequencial, tendo o somatório por safra e média do somatório por fase de desenvolvimento I, II e III, para cana-soca em Paranavaí-PR, estão apresentados nas Tabelas 3.6 e 3.7. Exceto para a safra 1999/00, verificou-se que os valores de precipitação (P) nas safras foram sempre superiores aos valores da evapotranspiração da cultura (ET_c). Esse fato sempre permitiu a ocorrência de altos valores de excedente hídrico, contudo, não impediram a ocorrência de deficiência hídrica ao longo do ciclo da cultura, em todas as safras (Tabela 3.6).

A deficiência hídrica ocorreu principalmente na fase de desenvolvimento II (crescimento em estatura), devido ao rápido desenvolvimento da cultura. Na fase de desenvolvimento II as plantas apresentaram grande área foliar e necessitaram de maior quantidade de água para realizar a troca de gases com a atmosfera (Ramesh, 2000; Inman-Bamber & Smith, 2005). A Tabela 3.6 apresenta um resumo contendo o valores médios (mm

ciclo⁻¹) dos componentes do balanço hídrico (*ETo*, *ETc*, *P*, *ER*, *Def* e *Exc*), que ocorreram de acordo com as fases de desenvolvimento (I, II e III), nas nove safras analisadas.

Tabela 3.6. Componentes hídricas do balanço hídrico (*ETo*, *ETc*, *ER*, *P*, *Def* e *Exc*), nas safras 1998/99 a 2008/09, para a cultura da cana-de-açúcar, ciclo cana-soca, na Estação Experimental da Universidade Federal do Paraná, Paranavaí-PR.

Safra	<i>ETo</i>	<i>ETc</i>	<i>ER</i>	<i>P</i>	<i>Def</i>	<i>Exc</i>	<i>ER/ETc</i>
	----- (mm safra ⁻¹) -----						
1997/98	1279,5	1180,0	1067,3	1625,0	112,7	551,6	0,9
1998/99	1235,3	1174,0	1020,6	1492,6	153,5	443,0	0,87
1999/00	1442,5	1320,0	913,7	1251,6	406,3	341,1	0,69
2000/01	1268,0	1198,6	1068,3	1659,0	130,4	586,9	0,89
2001/02	1387,6	1270,6	1043,2	1439,0	227,5	464,2	0,82
2002/03	1330,9	1233,7	1056,5	1479,2	177,2	408,6	0,86
2003/04	1327,8	1250,5	962,0	1508,8	288,4	500,3	0,77
2005/06	1294,6	1203,9	951,0	1373,8	252,9	433,1	0,79
2007/08	1363,4	1252,6	791,9	1003,6	460,7	147,6	0,63
Média	1325,5	1231,5	986,1	1425,8	245,5	430,7	0,8
<i>S</i>	64,74	47,40	91,87	188,49	114,70	121,93	0,09
CV (%)	4,9	3,8	9,3	13,2	46,7	28,3	10,9

Tabela 3.7. Componentes médios (safras 1997/98 a 2007/08) do balanço hídrico (*ETo*, *ETc*, *ER*, *P*, *Def* e *Exc*), nas diferentes fases de desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, ciclo cana-soca, na Estação Experimental da Universidade Federal do Paraná, Paranavaí-PR.

Fase de desenvolvimento	<i>ETo</i>	<i>ETc</i>	<i>P</i>	<i>ER</i>	<i>Def</i>	<i>Exc</i>
	----- (mm fase ⁻¹) -----					
I	318,7	127,5	270,6	112,3	15,2	146,7
II	697,2	871,2	753,7	627,9	243,3	144,4
III	325,8	244,4	308,8	203,0	41,4	103,7

Na fase de desenvolvimento I (brotação a intenso perfilhamento), a deficiência média ocorrida foi de 15,2 mm fase⁻¹. Conforme Inman-Bamber & Smith (2005), a cana-de-açúcar apresenta resiliência ao estresse hídrico moderado durante a fase de desenvolvimento I, não afetando o rendimento de sacarose e massa de colmo produzida. Na fase de desenvolvimento III (diminuição crescimento e acúmulo de sacarose), a deficiência média ocorrida foi de 41,4 mm fase⁻¹. Experimentos na fase de desenvolvimento III mostraram que o estresse hídrico eleva os teores de sacarose compensando as perdas de produção (Inman-Bamber & Smith, 2005).

3.3.4 Estimativa da produtividade da cana-soca em Paranavaí-PR

A obtenção de modelos a partir de funções comumente utilizados (linear, potencial, exponencial e logarítmica), a partir de análises de regressão simples e correlação, quando possível, é uma excelente forma de realizar estimativas sobre um determinado fenômeno, baseando-se no conhecimento de apenas uma variável independente. No entanto, a tentativa de ajustar os dados de produtividade das nove safras da cultura da cana-de-açúcar com parâmetros climáticos (ET_o , ET_c , ER , ER/ET_c e P) não apresentaram efeito significativo, resultando coeficiente de determinação (R^2) inferior a 0,39, para as equações do tipo linear, potencial, exponencial e logarítmica (Tabela 3.8).

Tabela 3.8. Coeficiente de determinação (R^2) obtido nas análises de regressão entre componentes do balanço hídrico e produtividade, empregando funções simplificadas.

Regressão	----- Coeficiente de determinação (R^2) obtidos nas análises -----				
	ET_o	ET_c	ER	ER/ET_c	P
Linear	0,098	0,1019	0,2558	0,1406	0,1271
Potência	0,0722	0,0868	0,3045	0,1953	0,2131
Exponencial	0,0754	0,0882	0,2882	0,1677	0,1692
Logarítmica	0,0948	0,1008	0,2718	0,1673	0,1704
Polinomial	0,1351	0,1074	0,3051	0,3114	0,3945

Como a estimativa da produtividade com a cultura da cana-de-açúcar não teve bons resultados nas análises de regressão empregando funções comumente utilizadas (linear, potencial, exponencial e logarítmica), a próxima tentativa consistiu em avaliar os modelos água-cultura empregando coeficientes obtidos na literatura (Tabela 3.9).

As análises comparando os valores de produtividade real versus estimada (nove safras), empregando modelos água-cultura com coeficientes recomendados na literatura (Tabela 3.9), evidenciaram que (Tabelas 3.10 e 3.11):

- Os coeficientes de determinação (R^2) ficaram entre 0,49 e 0,78 e os índices “ d ” ficaram entre 0,52 e 0,78;
- Conforme índice “ c ” de Camargo & Sentelhas (1997), os modelos de Stewart et al. (1976) proposto por Doorenbos & Kassan (1979) e Rao et al. (1988) classificaram-se como “bom”. O modelo de Jensen (1968) classificou-se como “mediano” e os demais modelos testados (Howell & Hiller, 1975; Minhas et al., 1974; Doorenbos & Kassan, 1979) ficaram classificados como “mau”;

- O modelo Stewart et al. (1976) proposto por Doorenbos & Kassan (1979) retornou as melhores estimativas de produtividade, apresentando R^2 e índice de concordância “ d ” igual a 0,78, o que levou a um desempenho (índice “ c ”) classificado como “bom”;
- A utilização de modelos água-cultura específicos e o emprego de coeficientes recomendados na literatura melhoram as estimativas das produtividades, em comparação as funções simplificados. Porém, os modelos testados ainda não permitiram a obtenção de nenhum modelo com resultado “muito bom” ou “ótimo”.

Diante do melhor resultado (“bom”) encontrado com a utilização dos modelos água-cultura empregando coeficientes ou fatores obtidos na literatura, outro procedimento recomendado para melhorar a precisão da estimativa da produtividade com modelos, consiste em realizar o ajuste estatístico de seus coeficientes ou fatores, com os dados das safras, por meio de análises de regressão linear ou múltipla.

Fazendo-se o ajuste estatístico, os coeficientes ou fatores (k_y , k_{y_i} e λ) encontrados nas análises com os modelos testados foram próximos e similares aos recomendados na literatura (Tabela 3.9), principalmente para o k_y obtido por meio da regressão com o modelo de Stewart et al. (1976) proposto por Doorenbos & Kassan (1979). A similaridade entre os valores dos coeficientes ou fatores ajustados estatisticamente e os recomendados na literatura (determinados em outras regiões e condições) evidencia que os modelos água-cultura testados têm significado físico. Embora sejam inúmeras as variáveis que participem do processo produtivo da cana-de-açúcar, a água caracteriza-se como uma das principais variáveis e esse é o motivo que faz com que os coeficientes e fatores sejam similares, mesma após a realização de ajustes estatísticos.

Tabela 3.9. Coeficientes e/ou fatores (k_y , k_{y_i} e λ) dos modelos água-cultura, recomendados na literatura e ajustados estatisticamente no presente trabalho para a cana-de-açúcar, ciclo cana-soca, em Paranavaí-PR.

Coeficiente ou fator	----- Fases -----			Todo o ciclo	Fonte
	I	II	III		
Recomendados na literatura					
λ	0,43	0,39	0,07	—	Jensen (1968)
ky	0,75	0,5	0,1	—	Doorenbos & Kassan (1979)
ky total	—	—	—	1,2	Doorenbos & Kassan (1979)

Ajustados estatisticamente em regressão simples ou múltipla com dados das safras					
λ	0,95	0,31	0,17	—	Regressão múltipla–Jensen (1968)
λ	1,91	1,55	0,90	—	Regressão múltipla–Minhas et al. (1974)
ky	0,82	0,36	0,15	—	Regressão múltipla
ky total	—	—	—	0,92	Regressão simples

Tabela 3.10. Coeficientes de determinação (R^2) e índice “ d ” obtidos nas análises comparando a produtividade real e estimada com os modelos água-cultura, para cana-de-açúcar, ciclo cana-soca, em Paranavaí-PR.

Modelo	---- Coeficiente de determinação ----		----- Índice “ d ” -----	
	Literatura	Com ajuste	Literatura	Com ajuste
Howell & Hiller (1975)	0,49	0,49	0,65	0,76
Minhas, Parikh & Srinivasan (1974)	0,75	0,74	0,52	0,92
Stewart et al. (1976) proposto por Doorenbos & Kassan (1979)	0,78	0,81	0,78	0,95
Doorenbos & Kassan (1979)	0,49	0,49	0,68	0,73
Rao, Sarma & Chander (1988)	0,77	0,80	0,77	0,93
Jensen (1968)	0,75	0,81	0,74	0,95

Tabela 3.11. Índice de desempenho de Camargo & Sentelhas (1997), obtidos nas análises contrastando produtividade real e estimada com os modelos água-cultura, para cana-de-açúcar, ciclo cana-soca, em Paranavaí-PR.

Modelo	--- Coeficientes da literatura---		--- Com ajuste dos coeficientes ---	
	Índice “ c ”	Classificação	Índice “ c ”	Classificação
Howell & Hiller (1975)	0,46	“mau”	0,53	“sofrível”
Minhas et al. (1974)	0,45	“mau”	0,79	“muito bom”
Stewart et al. (1976) proposto por Doorenbos & Kassan (1979)	0,69	“bom”	0,86	“ótimo”
Doorenbos & Kassan (1979)	0,48	“mau”	0,51	“sofrível”
Rao et al. (1988)	0,68	“bom”	0,83	“muito bom”
Jensen (1968)	0,64	“mediano”	0,86	“ótimo”

As análises comparando os valores de produtividade real versus estimada (nove safras), empregando coeficientes ajustados estatisticamente com dados das safras (Tabela 3.9), evidenciaram que (Tabelas 3.10 e 3.11):

- Com o ajuste estatístico dos coeficientes ou fatores (k_y , k_{yi} e λ), todos os modelos água-cultura analisados do presente estudo melhoraram suas estimativas de produtividade para cana-de-açúcar, ciclo-cana soca, em Paranavaí-PR (Tabela 3.9 e 3.10);
- Os coeficientes de determinação (R^2) ficaram entre 0,49 e 0,81 e os índices “ d ” ficaram entre 0,73 e 0,95;
- Conforme índice “ c ” de Camargo & Sentelhas (1997), os modelos de Stewart et al. (1976) proposto por Doorenbos & Kassan (1979) e Jensen (1968) classificaram-se como “ótimo”. Os modelo de Minhas et al. (1974) e Rao et al. (1988) classificaram-se como “muito bom”. Os resultados obtidos com esses quatro modelos são satisfatórios. Com resultados não muito

satisfatórios, os modelos de Howell & Hiller (1975) e Doorenbos & Kassan (1979) ainda classificaram-se como “sofrível”.

Na Figura 3.3 verifica-se as produtividades, real e estimada, da cana de açúcar, ciclo cana-soca, obtidas nas safras 1997/98 a 2007/2008, na Estação Experimental da Universidade Federal do Paraná, Paranavaí-PR. Visualmente, verificou-se que os seis modelos testados foram sensíveis às oscilações de produtividade, mesmo os modelos de Doorenbos & Kassan (1979) e Howell & Hiller (1975), que apresentaram índices “c” classificados como “sofrível”.

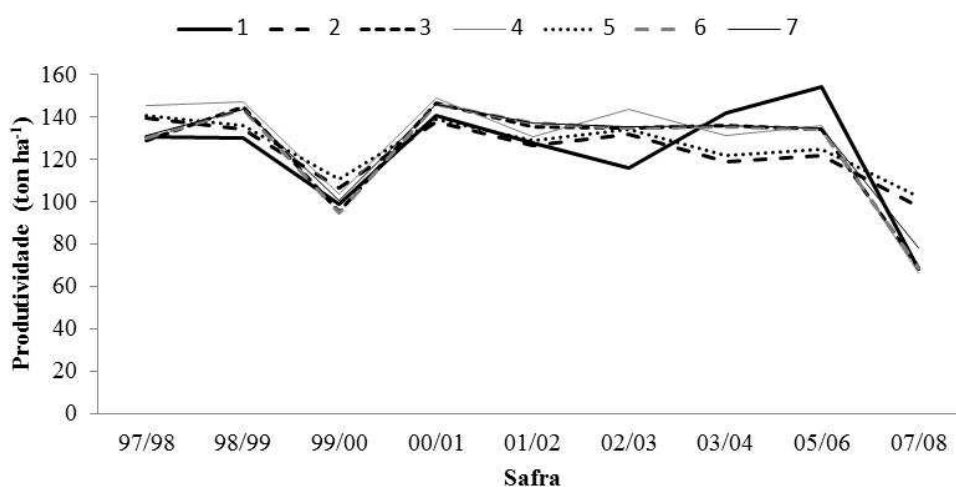


Figura 3.3 – Produtividade real e estimada da cana de açúcar, ciclo cana-soca, obtidas nas safras 1997/98 a 2007/2008, na Estação Experimental da Universidade Federal do Paraná, Paranavaí-PR: 1 - Produtividade real; Produtividade estimada com os modelos: 2 - Howell & Hiller (1975); 3 - Jensen (1968); 4 - Minhas et al. (1974); 5 - Doorenbos & Kassan (1979); 6 - Stewart et al. (1976) proposto por Doorenbos & Kassan (1979); 7 - Rao et al. (1988).

Os modelos de Stewart et al. (1976) proposto por Doorenbos & Kassan (1979) e Jensen (1968) apresentaram melhor desempenho e possibilitaram estimativas de produtividade com erro médio de 6,72% e 6,79%, respectivamente, em relação a produtividade real de cada safra. Dentre os modelos que obtiveram os melhores resultados, nota-se que os mesmos têm em comum o fato de serem do tipo produtivo, ou seja, multiplicativos, em que os efeitos desfavoráveis ocorridos em determinada fase de desenvolvimento impactam os resultados das demais fases de desenvolvimento, mesmo que esses não sofram restrições. Os resultados obtidos com os modelos indicam que a cana-de-açúcar, ciclo cana-soca, pode se comportar de forma semelhante frente às restrições hídricas.

3.3.5 Análise da sensibilidade de modelos

Dentre os seis modelos testados, o de Jensen (1968) foi um dos que apresentou o melhor conjunto de resultados. Desse modo, por apresentar bons resultados e também por ser muito utilizado na literatura, o modelo de Jensen (1968) foi selecionado para realizar uma análise de sensibilidade da produtividade da cana-de-açúcar, no ciclo de cana-soca, frente às variações da relação entre a evapotranspiração real e evapotranspiração da cultura (ER_i/ETc_i), nas i -ésimas fases de desenvolvimento (I, II e III) da cultura.

As análises realizadas com o modelo de Jensen (1968) demonstraram que a ocorrência de valores de relação ER_i/ETc_i inferiores a 1,0 ($Def = 0$), para um das i -ésimas fases, proporcionaram perdas de produtividade, podendo atingir valores nulos se a relação atingir valores próximos de zero. A variação se mostrou menos sensível para a fase de desenvolvimento III, para o qual baixos valores da relação ER_i/ETc_i impactaram menos a produtividade da cana-de-açúcar (Figura 3.4). De acordo com EMBRAPA (2009), relação ER_i/ETc_i superior a 0,6 nas i -ésimas fases de desenvolvimento, são suficientes para proporcionar desenvolvimento adequado à cultura da cana-de-açúcar e atingir bons níveis de produtividade. No entanto, os valores obtidos nas análises envolvendo o modelo de Jensen (1968), demonstraram que valores da relação ER_i/ETc_i ao atingirem o valor de 0,6, em uma única fase de desenvolvimento, proporcionaram significativa perda de produtividade. A magnitude da perda dependeu da fase de desenvolvimento em que ocorreu a deficiência hídrica. Valores de ER_i/ETc_i iguais a 0,6, ocorridos na fase de desenvolvimento I, proporcionaram 38,3% de perda da produtividade em relação a produtividade potencial (154,19 ton ha⁻¹). Para as fases de desenvolvimento II e III as perdas de produtividade foram da ordem de 14,7% e 8,2%, respectivamente, em relação à produtividade potencial.

A fase de desenvolvimento I foi o mais sensível à ocorrência de deficiência hídrica, impactando de forma mais evidente a produtividade com a variação da relação ER/ETc . Os resultados obtidos para a fase de desenvolvimento II evidenciaram condição intermediária entre as fases de desenvolvimento I e III, no que se refere à produtividade obtida quando se varia a relação ER/ETc (Figura 3.4). A diferença entre as perdas de produtividade ocorridos nas fases de desenvolvimento I em relação às fases de desenvolvimento II e III foi mais evidente. A variação da relação ER/ETc na fase de desenvolvimento III foi a que menos impactou a produtividade, concordando com Inman-Bamber & Smith (2005), quando afirmaram: que as fases iniciais de desenvolvimento da cana-de-açúcar são os mais

susceptíveis ao déficit hídrico; e, que as deficiências ocorridas na fase de desenvolvimento III, se forem de baixa magnitude, contribuem para o acúmulo de sacarose.

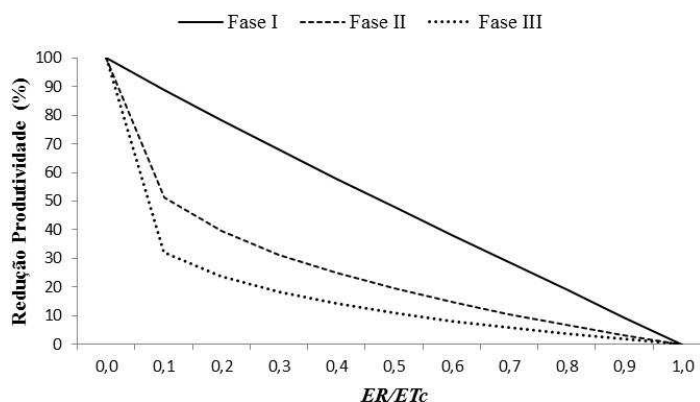


Figura 3.4 – Análise de sensibilidade do modelo de Jensen (1968), utilizando coeficientes ajustados estatisticamente, indicando a redução da produtividade em função da variação da relação ER/ETc , nas fases de desenvolvimento I, II e III: considerando a condição ótima da relação $ER/ETc_i = 1$ para duas das i -ésimas fases de desenvolvimento, e variando a relação ER/ETc (0 a 1) para apenas uma das fases de desenvolvimento (I, II ou III).

As análises de sensibilidade da produtividade da cana-de-açúcar como o modelo de Jensen (1968), tendo a relação ER/ETc_i fixa em 0,6 (*ISNA* - Índice de Satisfação das Necessidade de Água, considerado satisfatório) em duas i -ésimas fases de desenvolvimento estão apresentadas na Figura 3.5. A produtividade obtida com o valor satisfatório de *ISNA* (0,6) e tendo a relação $ER/ETc = 1$, para uma das fases de desenvolvimento, foi estimada em 74,4 ton ha⁻¹. O valor é 52,0% inferior à produtividade potencial obtida na melhor safra do ciclo cana-soca, no período entre 1997 a 2009 (154,19 ton ha⁻¹).

A Figura 3.6 contém as análises de sensibilidade realizadas para o modelo de Jensen (1968), considerando a variação simultânea da relação ER/ETc (0 a 1) para as i -ésimas fases de desenvolvimento. Os resultados evidenciaram que a ocorrência de valores de relação ER/ETc inferiores a 1,0 proporcionaram tendência semelhante ao ocorrido com a variação da relação ER/ETc para uma única fase de desenvolvimento por safra. Porém, as perdas de produtividade foram mais acentuadas. A magnitude das perdas variou em função da combinação das fases de desenvolvimento em que ocorreu a deficiência hídrica. As combinações que se mostraram mais sensível as alterações da relação ER/ETc foram as que continham a fase de desenvolvimento I (Figura 3.6). A variação dos valores da relação ER/ETc , compreendendo as fases de desenvolvimento I, II e III, simultaneamente, retornou

valores semelhantes aos encontrados na variação da relação ER/ET_c envolvendo apenas as fases de desenvolvimento I e II, indicando baixa influência na redução da produtividade pela fase de desenvolvimento III.

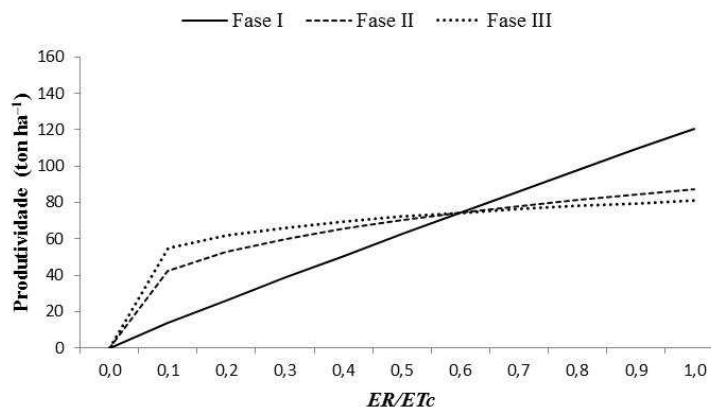


Figura 3.5 – Análise de sensibilidade do modelo de Jensen (1968), utilizando coeficientes ajustados estatisticamente, tendo a produtividade em função da variação da relação ER/ET_c , nas fases de desenvolvimento I, II e III: considerando a condição ótima da relação $ER_i/ET_{ci} = 0,6$ (ISNA satisfatório) para duas das i -ésimas fases de desenvolvimento, e variando a relação ER/ET_c (0 a 1) para apenas uma das fases de desenvolvimento (I, II ou III).

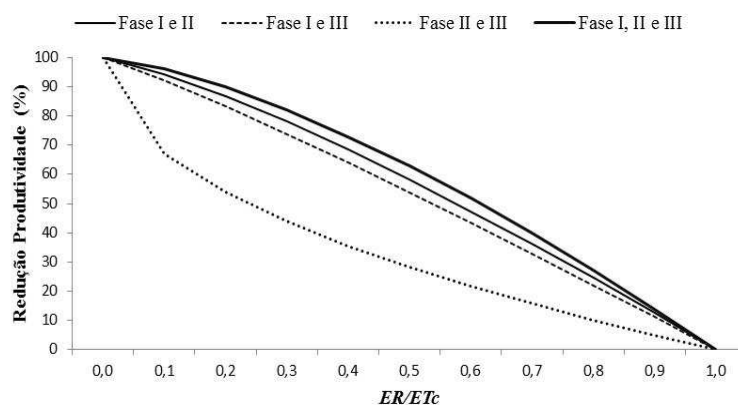


Figura 3.6 – Análise de sensibilidade do modelo de Jensen (1968), utilizando coeficientes ajustados estatisticamente, tendo a redução da produtividade em função da variação da relação ER/ET_c , nas fases de desenvolvimento I, II e III: considerando a condição ótima da relação $ER_i/ET_{ci} = 1,0$ e variando a relação ER/ET_c (0 a 1) para duas ou três fases de desenvolvimento simultaneamente (I e II; I e III; II e III; I, II e III).

3.4 CONCLUSÃO

As funções simplificadas (linear, potencial, exponencial, logaritmo) não possibilitaram, para Paranavaí-PR, a obtenção de estimativas de produtividade estatisticamente satisfatórias para cultura da cana-de-açúcar, ciclo cana-soca.

Os modelos água-cultura empregando coeficientes ou fatores de penalização da produtividade por déficit, obtidos na bibliografia, retornaram índices classificados entre “mau” e “mediano” para estimar a produtividade da cana-de-açúcar, ciclo cana-soca, em Paranavaí-PR.

Realizando o ajustamento dos coeficientes ou fatores de penalização da produtividade por déficit, os modelos de Stewart et al. (1976) proposto por Doorenbos & Kassan (1979) e Jensen (1968) obtiveram classificação “ótimo” para estimar a produtividade da cana-de-açúcar, ciclo cana-soca, em Paranavaí-PR. Os demais modelos testados ficaram classificados como “sofrível” e “muito bom”.

A análise de sensibilidade dos modelos revelou que a primeira fase de desenvolvimento da cana-soca é o período que mais influência na produtividade, devendo-se ter especial atenção à manutenção de níveis hídricos adequados nesse período.

3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. & SMITH, M. Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. 300p.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. & SMITH, J. Evapotranspiration del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO, 2006. 298 p. (Estudio Riego e Drenaje Paper, 56).
- ANDRADE JÚNIOR, A. S.; FIGUEREDO JÚNIOR, L. G. M.; CARDOSO, M. J. & RIBEIRO, V. Q. Parametrização de modelos agrometeorológicos para estimativa de produtividade da cultura do milho na região de Parnaíba, Piauí. Revista Ciência Agronômica, v.37, n.2, p.130-134, 2006
- ARAUJO, M. A. Modelos agrometeorológicos na estimativa da produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa - Paraná. Universidade Federal do Paraná, Dissertação de Mestrado, p. 124, 2008.
- BERLATO, M. A. Modelo de relação entre o rendimento de grãos da soja e o déficit hídrico para o estado do Rio Grande do Sul. São José dos Campos, 1987. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- CAMARGO, A. P. & SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas de evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CRUZ, A. C.; LIBARDI, P. L.; CARVALHO, L. A. & ROCHA, G. C. Balanço de água no volume de solo explorado pelo sistema radicular de uma planta de citros. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 29, n. 4, p. 1-10, 2005.
- DOORENBOS, J. & KASSAM, A. H. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage. Rome: FAO, paper 33, p. 197. 1979.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa CNPS, 1997.

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar. In: Manzatto, C.V. Embrapa Solos, Rio de Janeiro-RJ, 2009. 55p.
- FARIAS, C. H.; FERNANDES, P. D.; AZEVEDO, H. M. & NETO, J. D. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, n. 83, p. 356-362, 2008.
- FRIZZONE, J. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SOUZA, J. L. M. & ZOCOLER, J. L. Funções de produção água-cultura. Planejamento de irrigação: análise e decisão de investimento. Brasília: Embrapa, p. 283-314. 2005.
- HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its application. *Agricultural and Forest Meteorology*, Davis, USA, n. 103, p. 137-157, 2000.
- HOWELL, T. A. & HILER, E. A. Optimization of water use efficiency under high frequency irrigation *Transactions of the ASAE*, v. 18, p. 873-878, 1975.
- IDO, O. T.; DAROS, E.; ZAMBON, J. L.C.; WEBER, H.; BUSO, P. H. M. & OLIVEIRA, R. A. Crescimento e distribuição radicial de três cultivares de cana-de-açúcar, em cana soca, em dois tipos de solo, em rizotron. I. Uso do WinRHIZO. *Scientia Agraria*, v. 7, n.1-2, p. 21-26, 2006.
- INMAN-BAMBER, N. G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. *Field Crops Research*.v.89, p.107-122, 2004, Amsterdam, 2004.
- INMAN-BAMBER, N. G. & SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Field Crops Research*, v.92, p.185-202, 2005.
- JENSEN, M. E. Water consumption by agricultural plants. In: KOZLOWSKI, T. T., (Ed.) *Water deficits and plant growth*. New York, Academic Press, v.2, p. 1-22, 1968.
- MACHADO, E. C.; PEREIRA, A. R.; FAHL, J. I.; ARRUDA, J. V. & CIONE, J. Índices biométricos de duas cultivares de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.17, n.9, p1323-1329, 1982.
- MINHAS, B. S.; PARIKH, K. S. & SRINIVASAN, T. N. Towards the structure of a production function for wheat yields with dated inputs of irrigation water. *Water Resource Research*, v.10, p. 383-393, 1974.

- MORAES, A. V.; CAMARGO, M. B.; MASCARENHAS, H. A.; MIRANDA, M. A. & PEREIRA, J. C. Teste e análise de modelos agrometeorológicos de estimativa de produtividade para a cultura da soja na região de Ribeirão Preto. *Bragantia*, v. 57, n. 2, p. 11, 1998.
- PREVEDELLO, C. L. Programa SPLINTEX para estimar a curva de retenção de água a partir da granulometria (composição) do solo – Versão 1.0. 1999.
- RAMESH, P. Effect of Different Levels of Drought during the Formative Phase on Growth Parameters and its Relationship with Dry Matter Accumulation in Sugarcane. *J. Agronomy & Crop Science*, v. 185, p. 7, 2000.
- RAO, N. H.; SARMA, P. B. S. & CHANDER, S. A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v. 13, p. 25-32, 1988.
- RIJTEMA, P.E.; ABOUKHALED, A. Crop water use. In: ABOUKHALED, A.; ARAR, A., BALBA, A.M.; BISHAY, B.G.; KADRY, L.T.; RIJTEMA, P.E. & TAHER, A. Research on crop water use, salt affected soils and drainage in the Arab Republic of Egypt. FAO Regional Office for the Near East, 1975. p.5-61.
- SECRETARIA DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO DO PARANÁ - SEAB. Estimativa de safra. Disponível em: <www.seab.pr.gov.br> Acesso em: 22/03/2012
- SILVA, D. K. T.; DAROS, E.; ZAMBOM, J. L. C.; WEBER, H.; IDO, O. T.; ZUFFELLATO-RIBAS, K. C.; KOEHLER, H. S. & OLIVEIRA, R. A. Análise de crescimento em cultivares de cana-de-açúcar em Cana-Soca no Noroeste do Paraná na safra 2002/2003. *Scientia Agraria*, v.6, p.47-53, 2005.
- SILVA, F. C. & BERGAMASCO, A. F. LEVANTAMENTO DE MODELOS MATEMÁTICOS DESCRITOS PARA A CULTURA DA CANA-DE- AÇÚCAR. *Rev. Biociênc.*, Taubaté, v. 7, n. 1, p. 7-14, 2001.
- SILVA, M. D.; ALBERTO, J.; ENCISO, J.; SHARMA, V. & JIFON, J. Yield Components as indicators of drought tolerance of sugarcane. *Scientia Agrícola*, v. 65, n. 6, p. 620-627, 2008.
- SINCLAIR, T. R.; GILBERT, R. A.; PERDOMO, R. E.; SHINE Jr., J. M.; POWELL, G. & MONTES, G. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. *Field Crops Research*. v.88, p.171-178, 2004

- SOUZA, J. L. M. Programa MORETTI – Módulo: Balanço hídrico seqüencial (periodicidade: 1, 5, 7, 10, 15 e 30 dias), versão 1.0. Curitiba: DSEA/SCA/UFPR, 2008 (Programa computacional).
- STEWART, J. I.; HAGAN, R. M. & PRUITT, W. O. Production functions and predicted irrigation programs for a principal crops as required for water resources planning and increased water efficiency: final report. Washington: U.S. Department of Interior, 1979. p. 80.
- THORNTON, C. W. & MATHER, J. R.; The water balance. Drexel Institute of Technology – Laboratory of Climatology, Publications in Climatology, Centerton, N.J. v. 8, n. 1, 104p., 1955.
- VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of American Journal, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.
- WILLMOT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, J. J.; FEDDEMA, K. M. & KLINK, D. R. Statistics for the evaluation and comparison of models. Journal of Geophysical Research, v. 90, n. C5, p.8995-9005, 1985.
- WIEDENFELD, R. P. Water stress during different sugarcane growth periods on yield and response to N fertilizer. Agricultural Water Management, v.43 p.173–182, 2000.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização do balanço hídrico diário empregando uma metodologia simplificada e de baixo custo permitiu, a partir de equações de estimativa do armazenamento da água no solo, identificar e quantificar adequadamente a ocorrência de estresse hídrico no decorrer do desenvolvimento da cana-de-açúcar, bem como possibilitou a caracterização do comportamento agroclimático da cultura para o município de Paranavaí-PR, a qual se mostrou “Indicada”.

As análises de balanço hídrico realizadas indicaram que todas as fases de desenvolvimento apresentaram deficiência e excedente hídrico, sendo que a fase de desenvolvimento II foi a que apresentou valores mais acentuados de deficiência, tanto para o ciclo cana-planta como cana-soca. Nesse sentido, a análise de irrigação complementar gerada pelo balanço hídrico demonstrou que a fase de desenvolvimento II, ciclos cana-planta e cana-soca, foram os períodos que apresentaram maior necessidade de irrigação complementar (367,3 mm fase⁻¹ para cana-planta e 368,8 mm fase⁻¹ para cana-soca). Para as safras analisadas, a lâmina total de irrigação variou entre 218,7 e 848,9 mm safra⁻¹, com média de 508,8 mm safra⁻¹ para cana-planta e 486,5 mm safra⁻¹ para cana-soca, indicando que o produtor ao instalar uma área de cultivo deverá: contemplar cultivares mais tolerantes ao déficit hídrico; empregar práticas de manejo que contornem a possibilidade de ocorrer deficiência nos períodos críticos; ou, pode fazer opção por utilizar irrigação, o que necessitaria de uma avaliação econômica para verificar a viabilidade.

Quanto à caracterização agroclimática, verificou-se para Paranavaí-PR que o Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA) médio foi de 0,80 para cana-planta e 0,76 para cana-soca, indicando não haver restrições para o ciclo total, mas sim deficiências concentradas em algumas safras, de forma mais evidente sobre a fase de desenvolvimento II. No entanto, de acordo com a metodologia estudada, verificou-se que Paranavaí-PR possui baixo risco agroclimático, apresentando classificação “Indicada” (B), tendo como ressalva a irrigação de salvamento na fase de desenvolvimento II, para os ciclos de cana-planta e cana-soca.

A estimativa das produtividades empregando funções simplificadas e modelos água-cultura, empregando coeficientes disponíveis na literatura, não retornaram resultados satisfatórios. Dessa forma, às análises se voltaram ao ajuste local dos coeficientes, para serem empregados posteriormente nos modelos água-cultura. Com o ajustamento estatístico dos

coeficientes às condições locais de Paranaíba – PR, observou-se melhoria nas estimativas das produtividades, que foram satisfatórias estatisticamente. Dentre os seis modelos água-cultura testados no presente estudo, os modelos de Stewart et al. (1976) proposto por Doorenbos & Kassan (1979) e Jensen (1968) obtiveram classificação “ótimo” para estimar a produtividade da cana-de-açúcar, ciclo cana-soca, em Paranaíba-PR. Os demais modelos testados ficaram classificados entre “suficiente” e “muito bom”. Os resultados finais das análises com os modelos água-cultura foram satisfatórios e sugerem que tanto os modelos de Stewart et al. (1976) proposto por Doorenbos & Kassan (1979) e Jensen (1968) podem ser utilizados com êxito para estudos de planejamento envolvendo a cultura da cana-soca na região de Paranaíba-PR. Seria bastante interessante, também, a realização de análises envolvendo a simulação de produtividade com a cana-planta, pois esse ciclo se mostrou mais susceptível às variações climáticas, podendo responder de forma aceitável as estimativas geradas pelos modelos água-cultura empregados. No presente trabalho essas análises não foram realizadas devido ao número insuficiente de safras.

APÊNDICE 1 – Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração real (ER), para o cultivo da cana-planta, nas safras 1997/98 à 2008/09, em Paranavaí-PR.

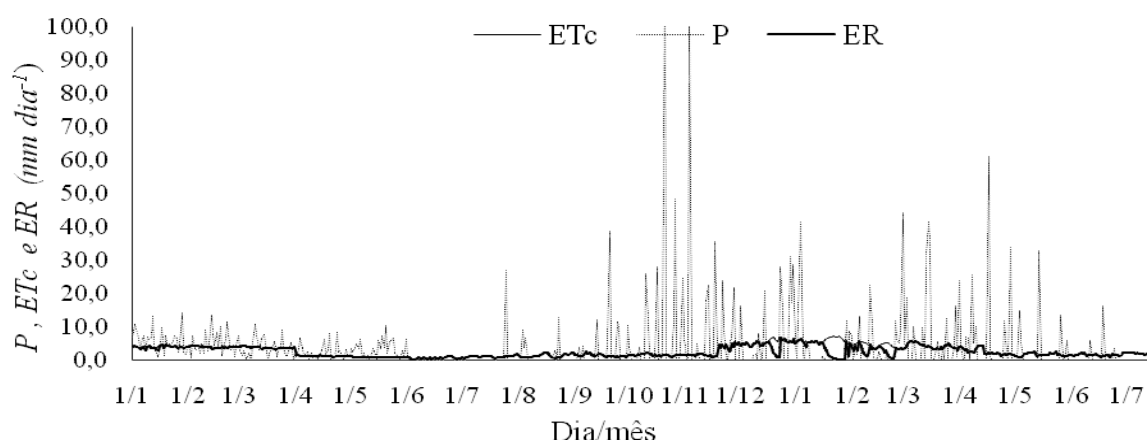


Figura A1.1 – Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração real (ER) para o cultivo da cana-planta, na safra 1997/1998, Paranavaí-PR.

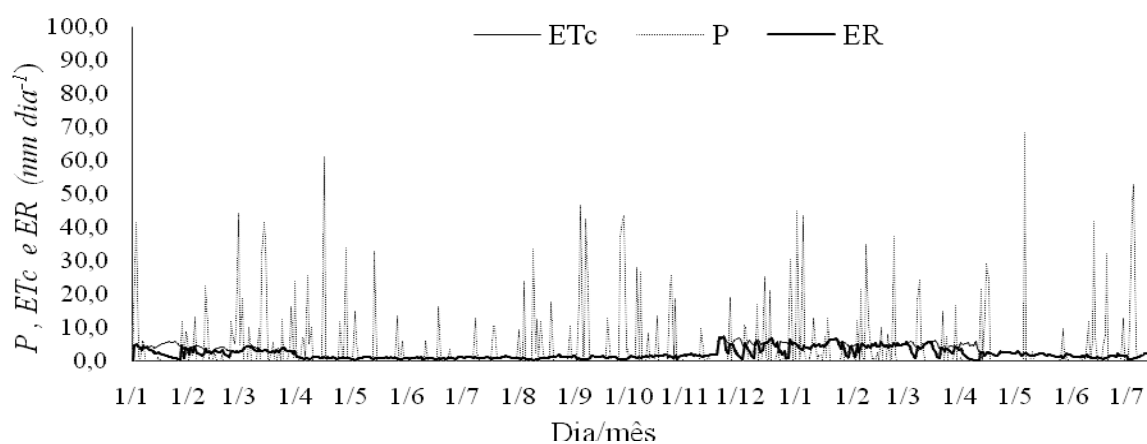


Figura A1.2 – Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração real (ER) para o cultivo da cana-planta, na safra 1998/1999, Paranavaí-PR.

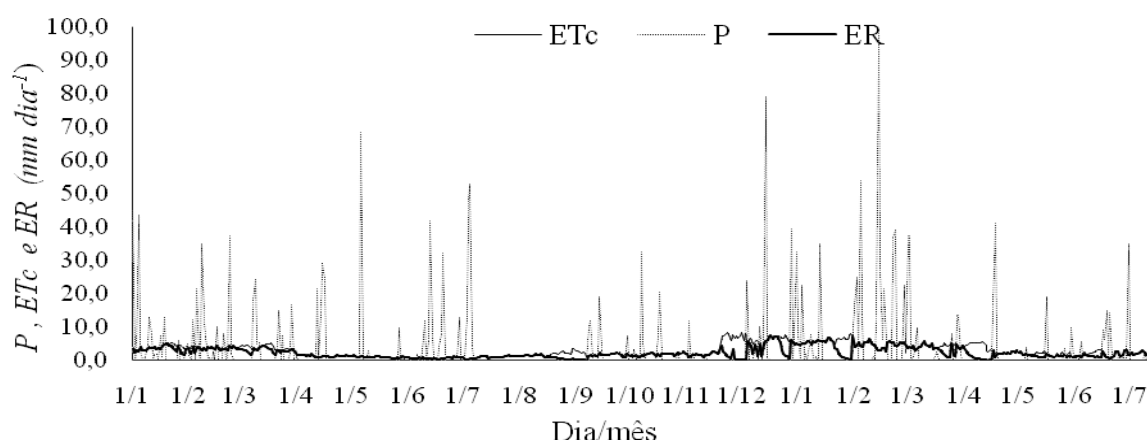


Figura A1.3 – Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração real (ER) para o cultivo da cana-planta, na safra 1999/2000, Paranavaí-PR.

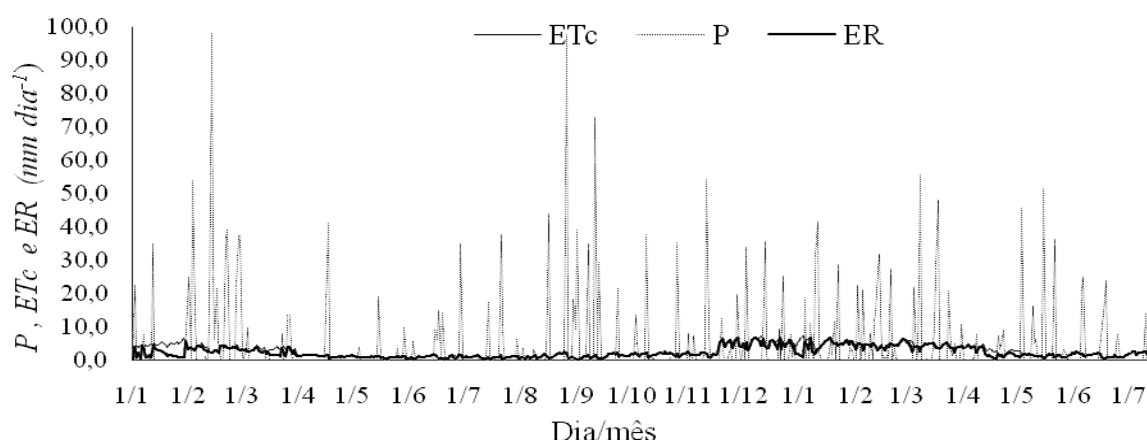


Figura A1.4 – Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração real (ER) para o cultivo da cana-planta, na safra 2000/2001, Paranavaí-PR.

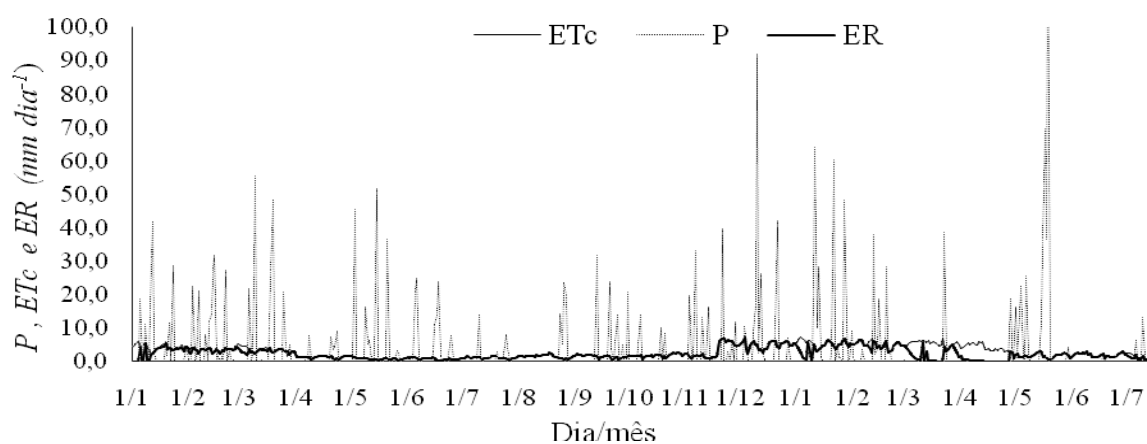


Figura A1.5 – Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração real (ER) para o cultivo da cana-planta, na safra 2001/2002, Paranavaí-PR.

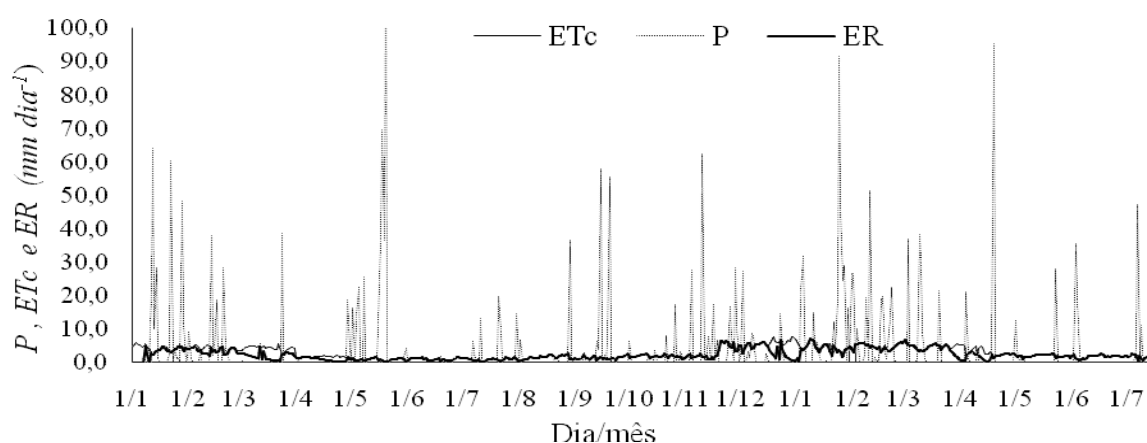


Figura A1.6 – Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração real (ER) para o cultivo da cana-planta, na safra 2002/2003, Paranavaí-PR.

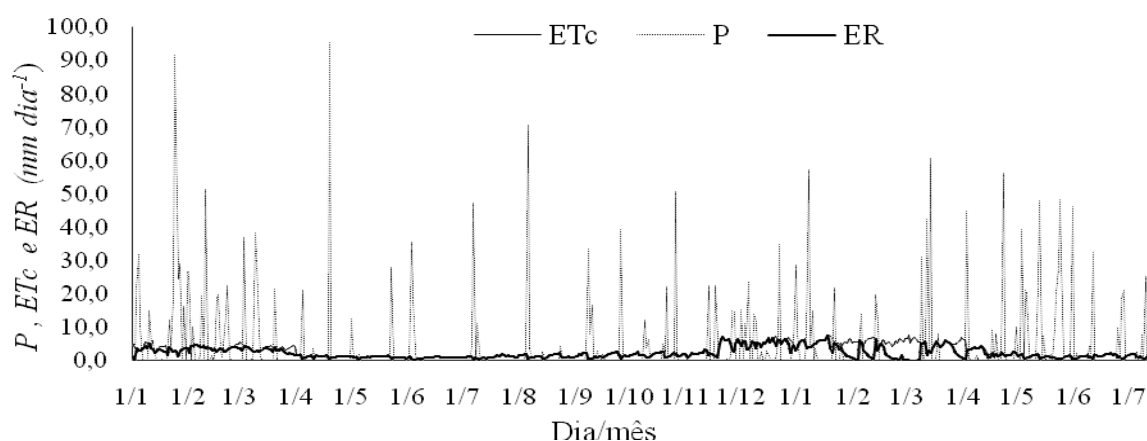


Figura A1.7 – Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração real (ER) para o cultivo da cana-planta, na safra 2003/2004, Paranavaí-PR.

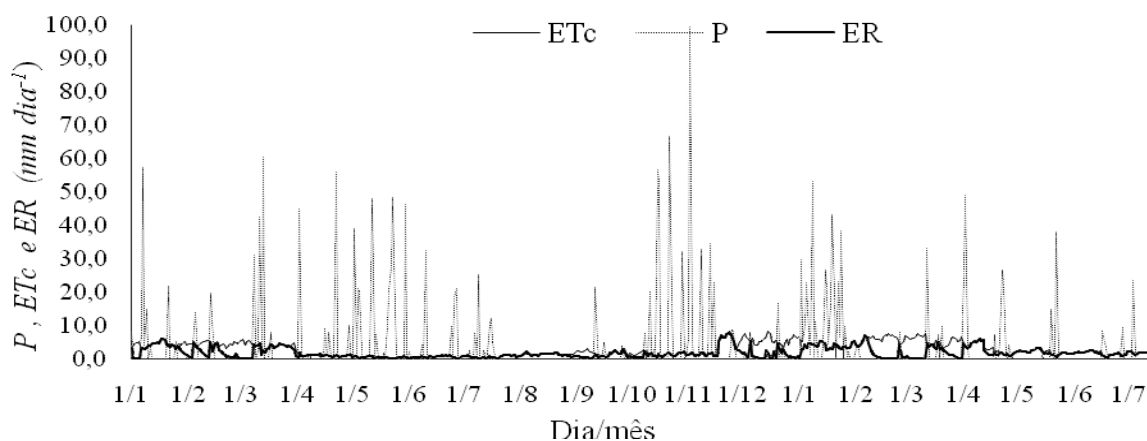


Figura A1.8 – Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração real (ER) para o cultivo da cana-planta, na safra 2004/2005, Paranavaí-PR.

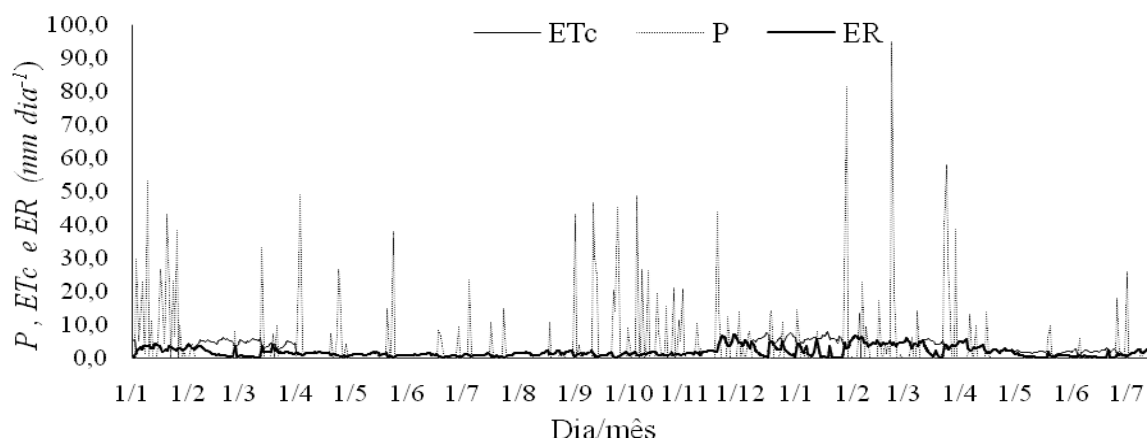


Figura A1.9 – Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração real (ER) para o cultivo da cana-planta, na safra 2005/2006, Paranavaí-PR.

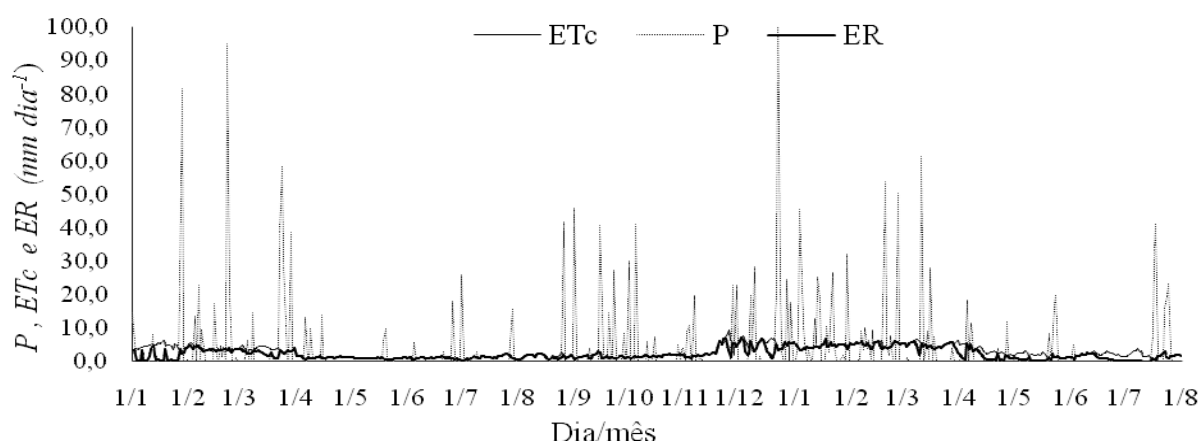


Figura A1.10 – Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração real (ER) para o cultivo da cana-planta, na safra 2006/2007, Paranavaí-PR.

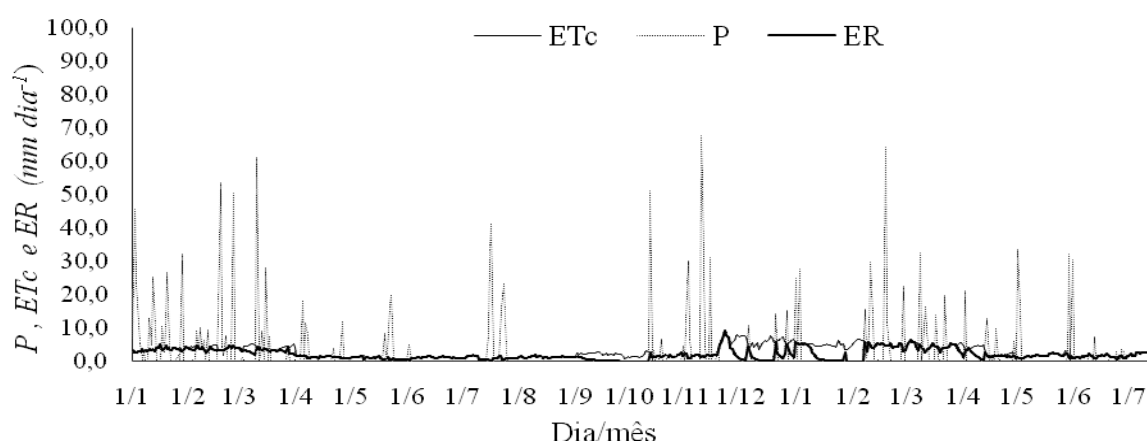


Figura A1.11 – Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração real (ER) para o cultivo da cana-planta, na safra 2007/2008, Paranavaí-PR.

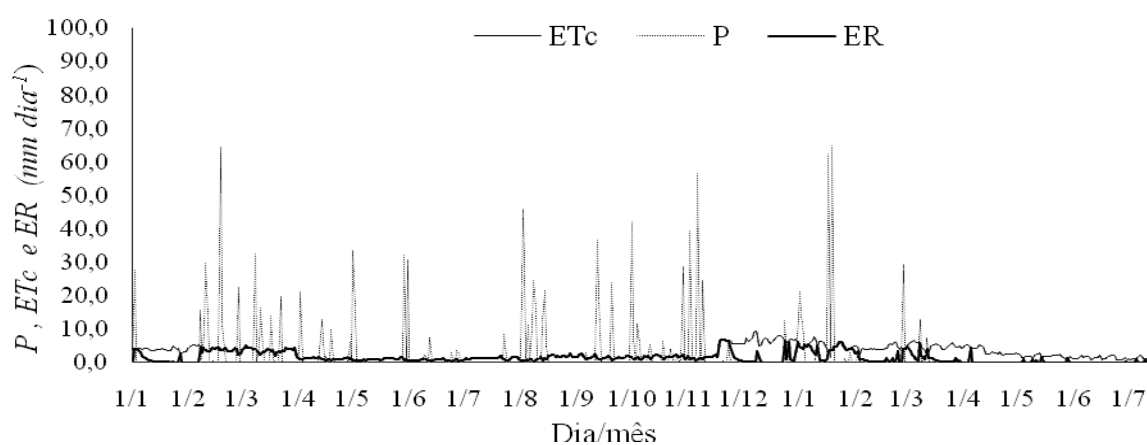


Figura A1.12 – Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração real (ER) para o cultivo da cana-planta, na safra 2008/2009, Paranavaí-PR.

APÊNDICE 2 – Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração real (ER), para o cultivo da cana-soca, nas safras 1997/98 à 2008/09, em Paranavaí-PR.

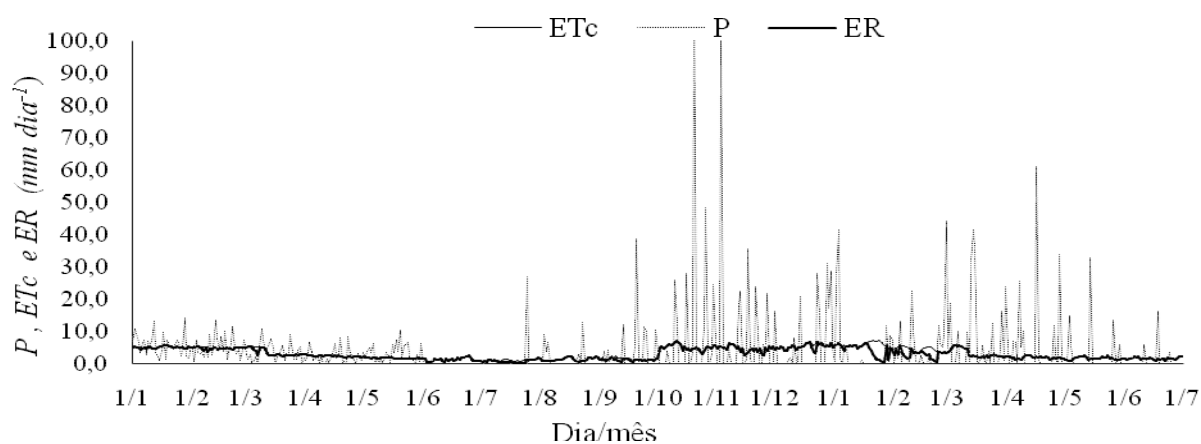


Figura A2.1 – Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração real (ER) para o cultivo da cana-soca, na safra 1997/1998, Paranavaí-PR.

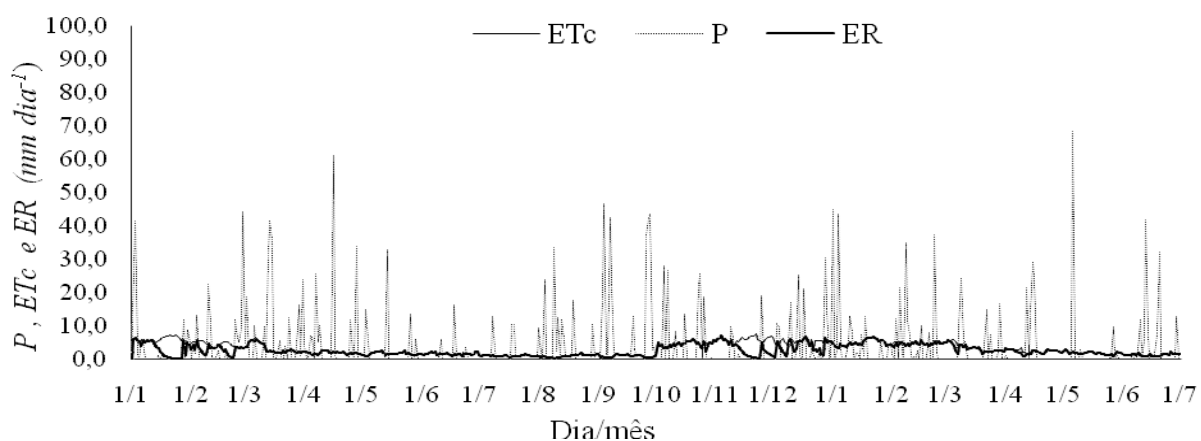


Figura A2.2 – Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração real (ER) para o cultivo da cana-soca, na safra 1998/1999, Paranavaí-PR.

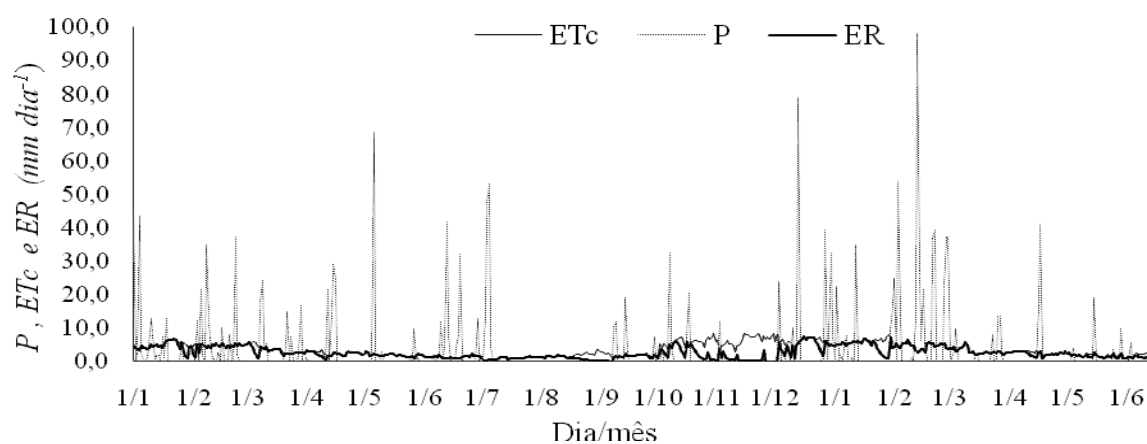


Figura A2.3 – Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração real (ER) para o cultivo da cana-soca, na safra 1999/2000, Paranavaí-PR.

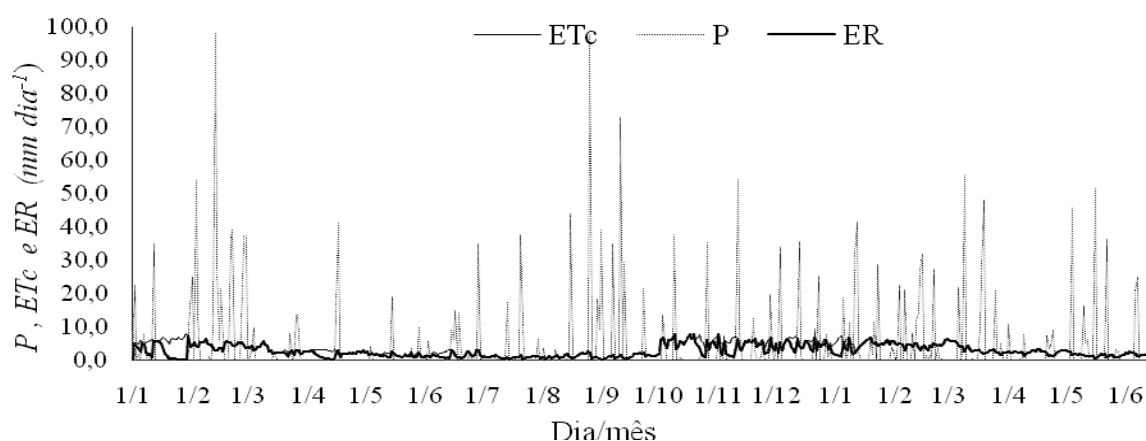


Figura A2.4 – Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração real (ER) para o cultivo da cana-soca, na safra 2000/2001, Paranavaí-PR.

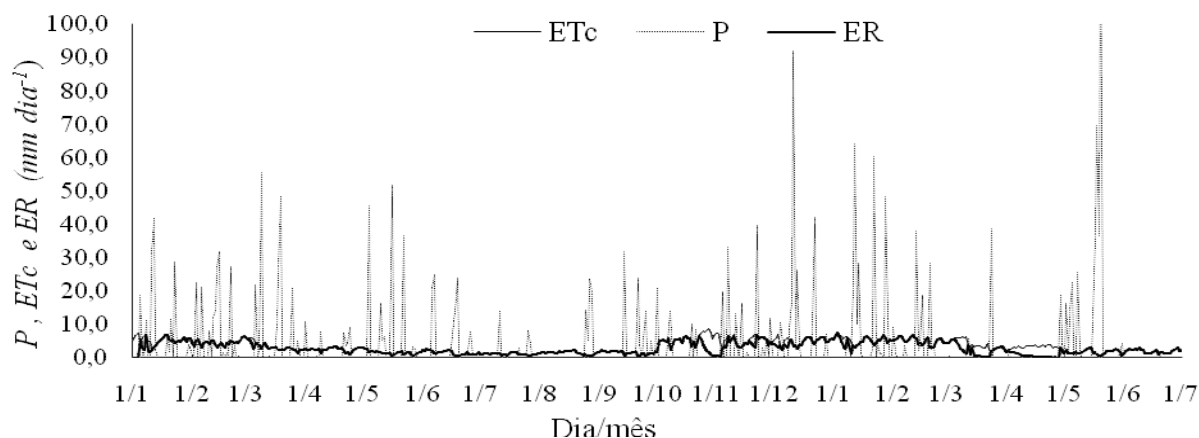


Figura A2.5 – Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração real (ER) para o cultivo da cana-soca, na safra 2001/2002, Paranavaí-PR.

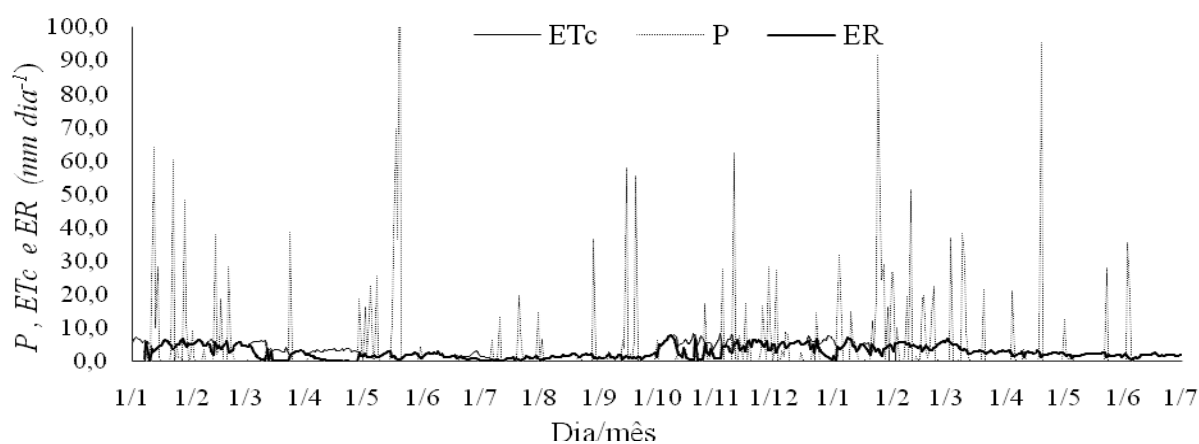


Figura A2.6 – Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração real (ER) para o cultivo da cana-soca, na safra 2002/2003, Paranavaí-PR.

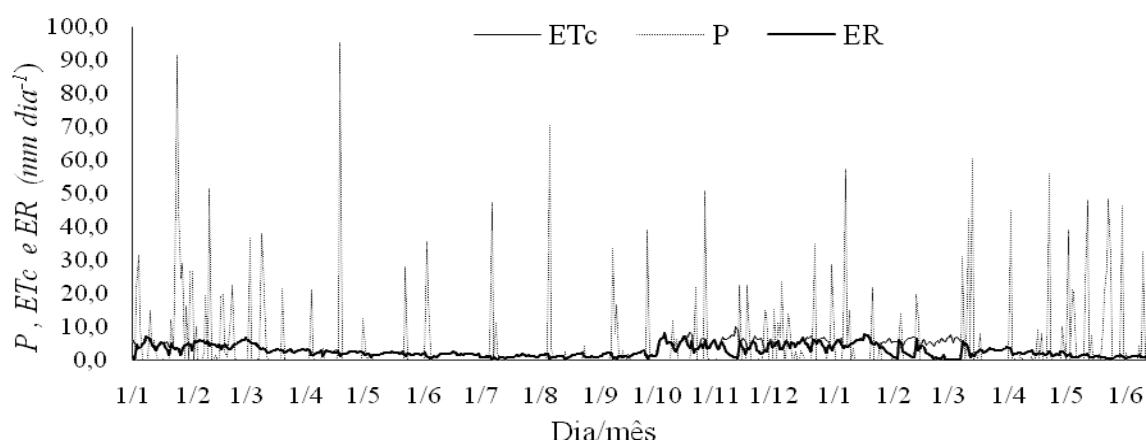


Figura A2.7 – Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração real (ER) para o cultivo da cana-soca, na safra 2003/2004, Paranavaí-PR.

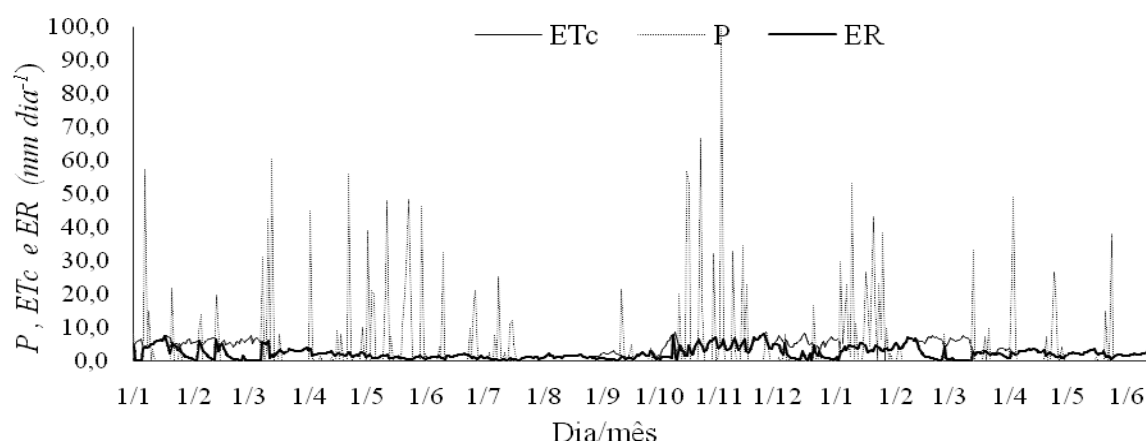


Figura A2.8 – Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração real (ER) para o cultivo da cana-soca, na safra 2004/2005, Paranavaí-PR.

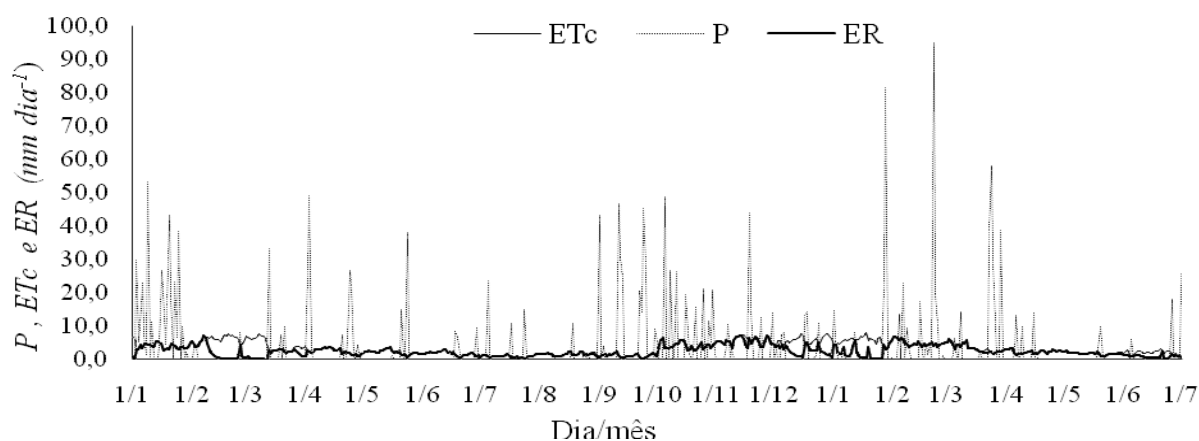


Figura A2.9 – Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração real (ER) para o cultivo da cana-soca, na safra 2005/2006, Paranavaí-PR.

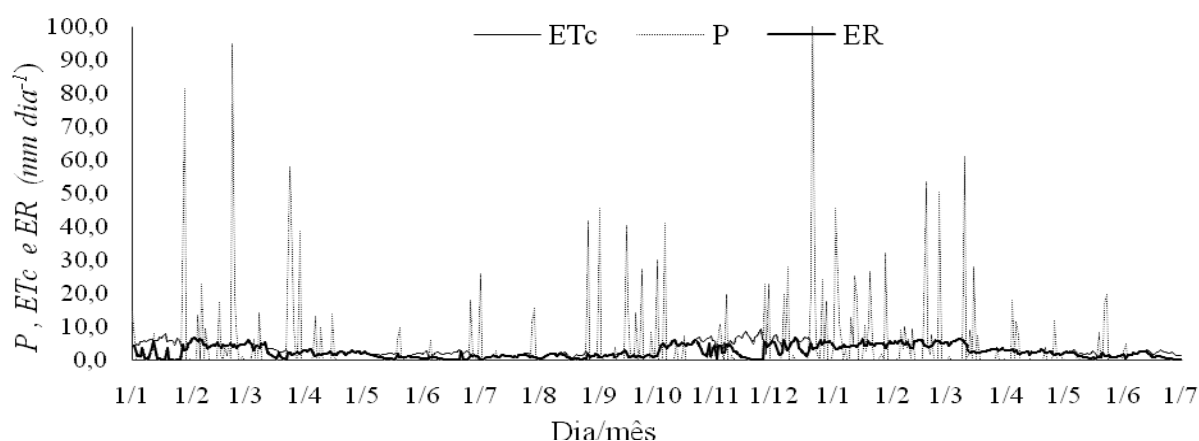


Figura A2.10 – Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração real (ER) para o cultivo da cana-soca, na safra 2006/2007, Paranavaí-PR.

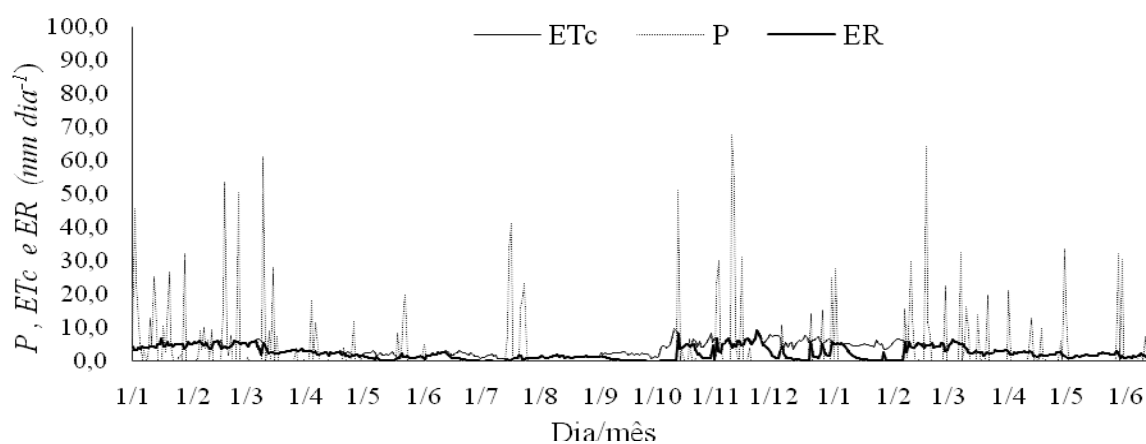


Figura A2.11 – Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração real (ER) para o cultivo da cana-soca, na safra 2007/2008, Paranavaí-PR.

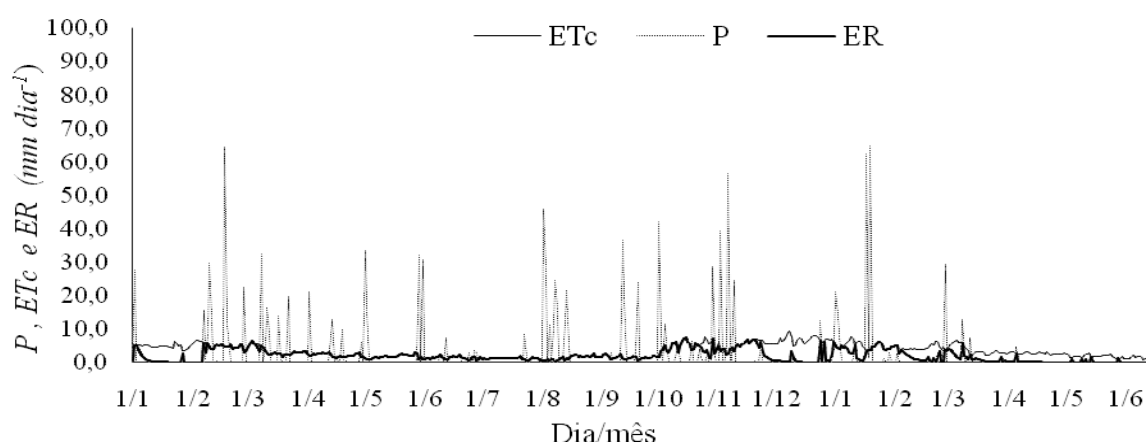


Figura A2.12 – Evapotranspiração da cultura (ET_c), precipitação (P) e evapotranspiração real (ER) para o cultivo da cana-soca, na safra 2008/2009, Paranavaí-PR.

APÊNDICE 3 – Deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*), para o cultivo da cana-planta, nas safras 1997/98 à 2008/09, em Paranavaí-PR.

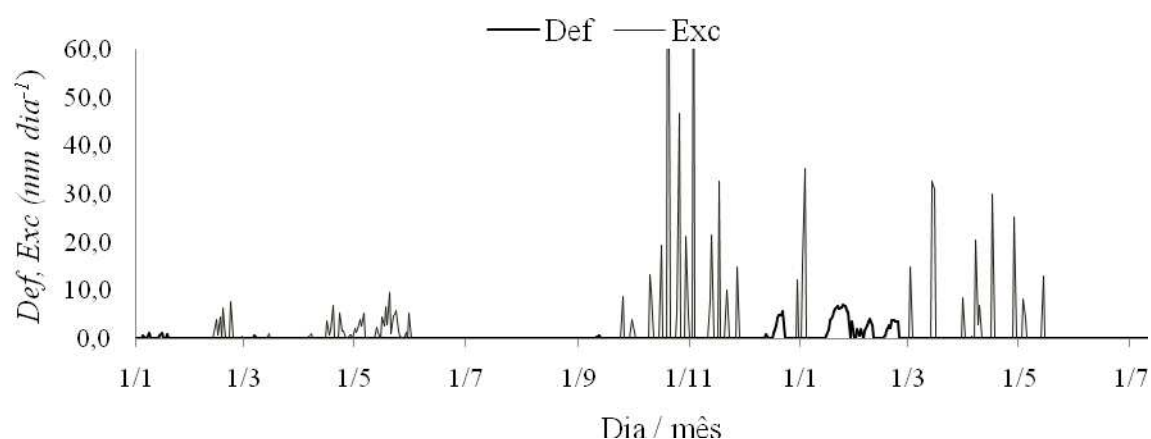


Figura A3.1 – Deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*) para o cultivo da cana-planta, na safra 1997/1998, Paranavaí-PR.

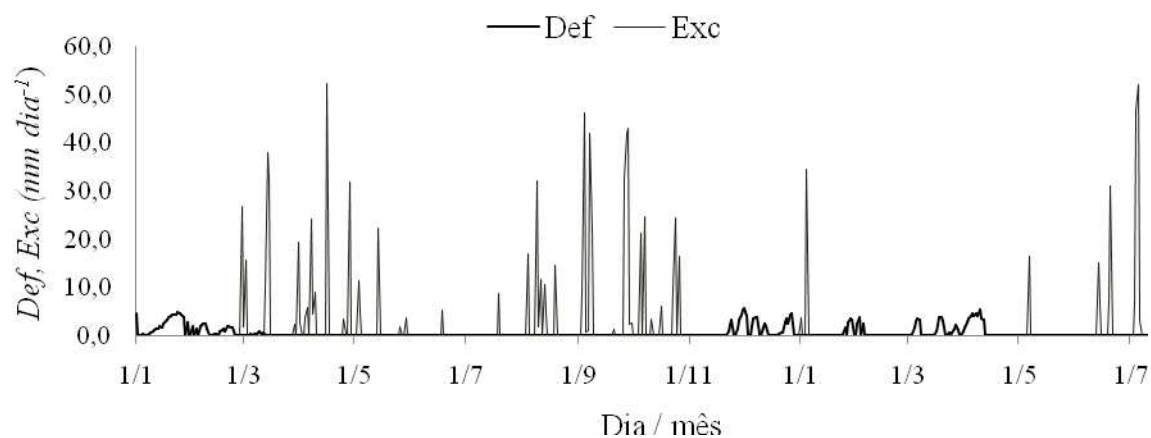


Figura A3.2 – Deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*) para o cultivo da cana-planta, na safra 1998/1999, Paranavaí-PR.

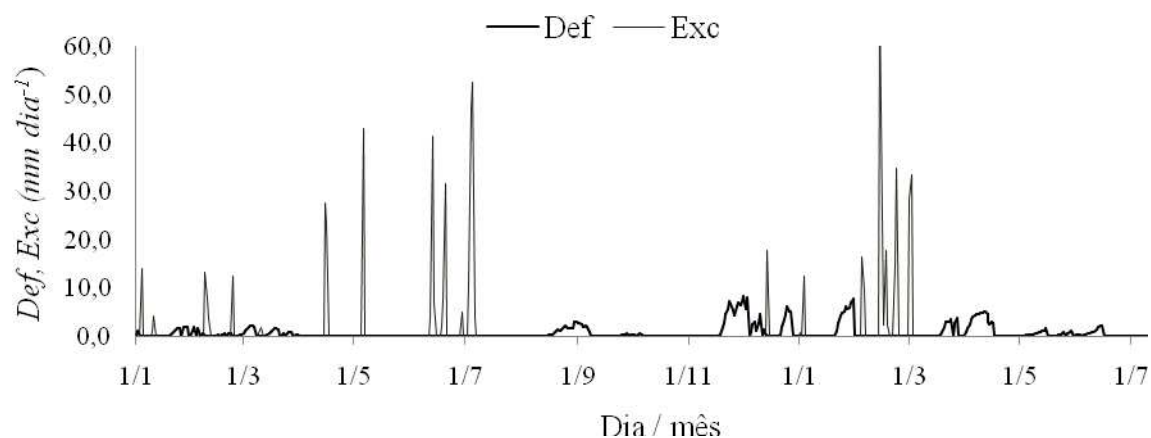


Figura A3.3 – Deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*) para o cultivo da cana-planta, na safra 1999/2000, Paranavaí-PR.

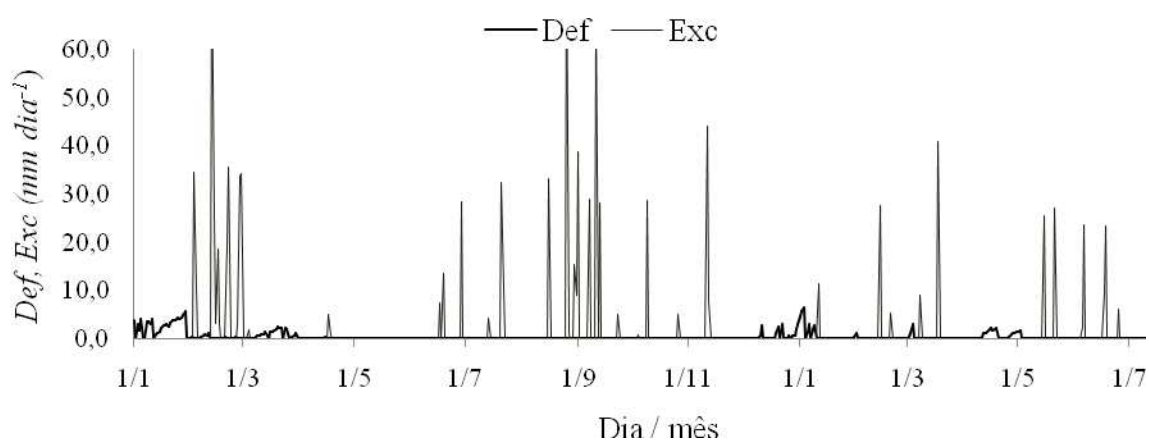


Figura A3.4 – Deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*) para o cultivo da cana-planta, na safra 2000/2001, Paranavaí-PR.

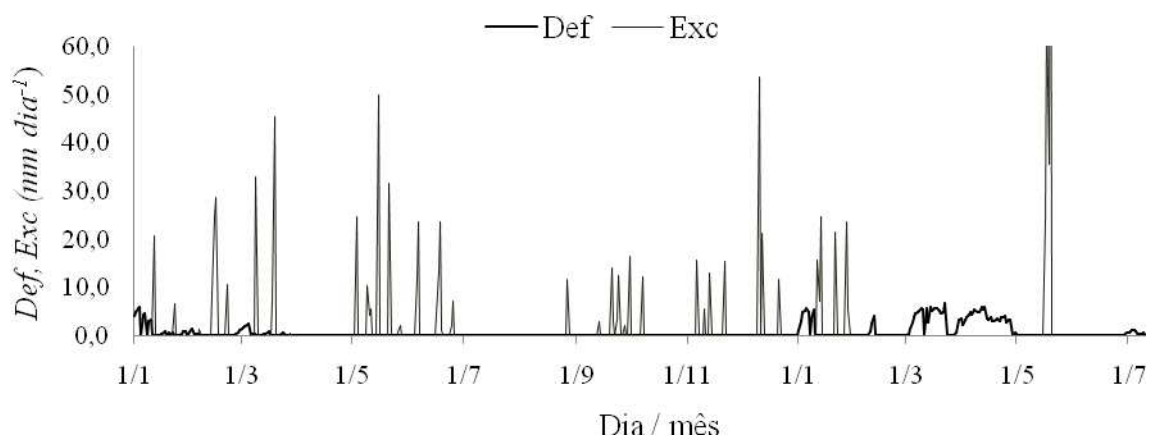


Figura A3.5 – Deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*) para o cultivo da cana-planta, na safra 2001/2002, Paranavaí-PR.

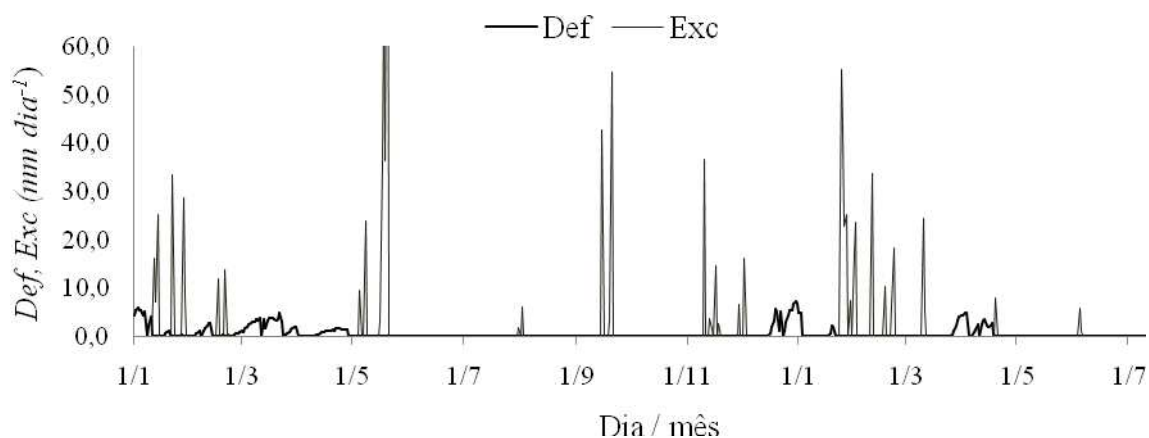


Figura A3.6 – Deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*) para o cultivo da cana-planta, na safra 2002/2003, Paranavaí-PR.

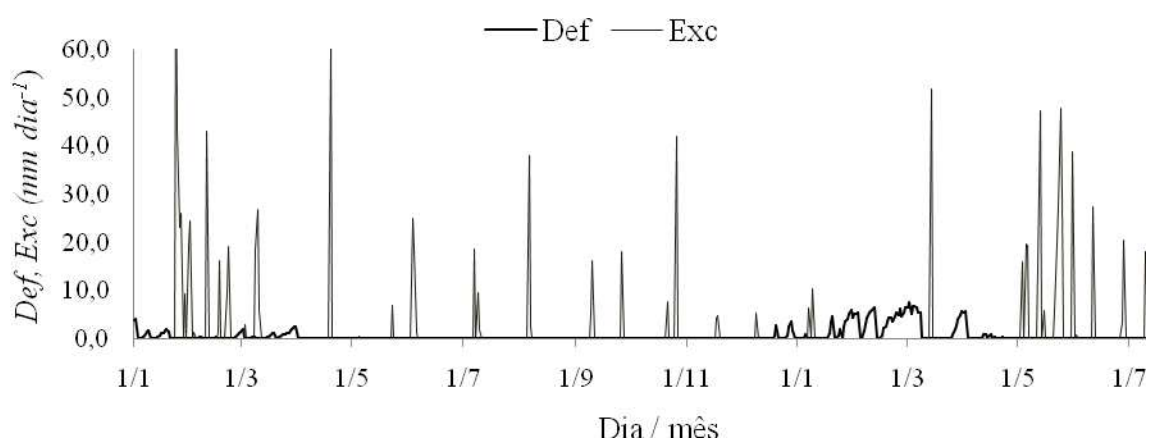


Figura A3.7 – Deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*) para o cultivo da cana-planta, na safra 2003/2004, Paranavaí-PR.

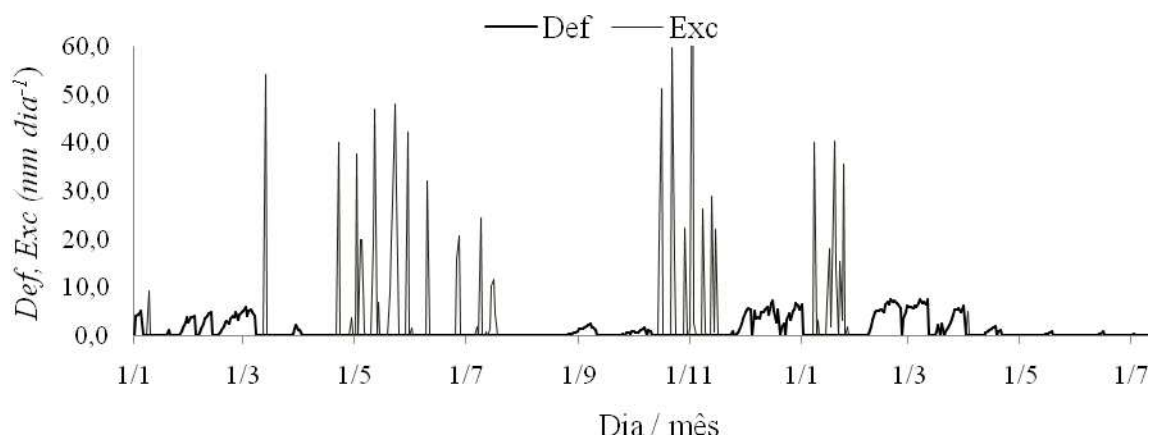


Figura A3.8 – Deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*) para o cultivo da cana-planta, na safra 2004/2005, Paranavaí-PR.

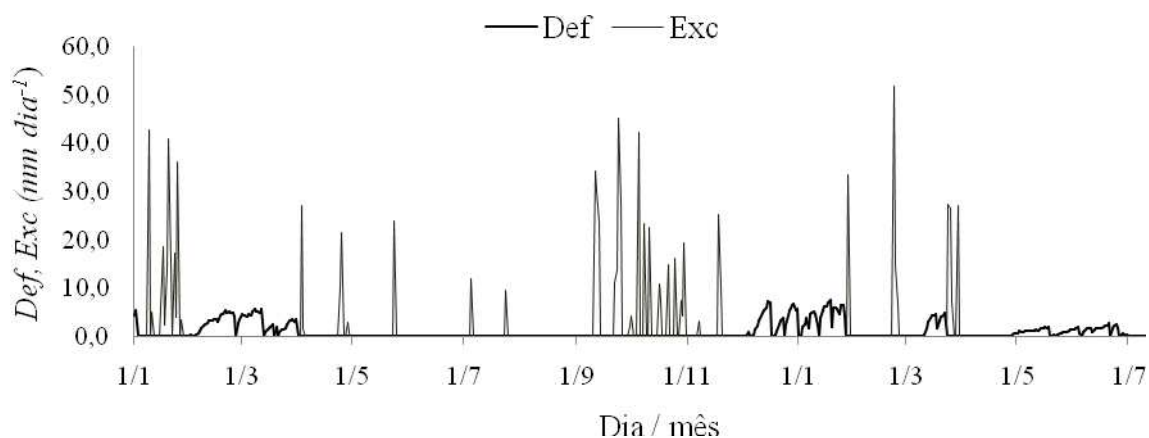


Figura A3.9 – Deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*) para o cultivo da cana-planta, na safra 2005/2006, Paranavaí-PR.

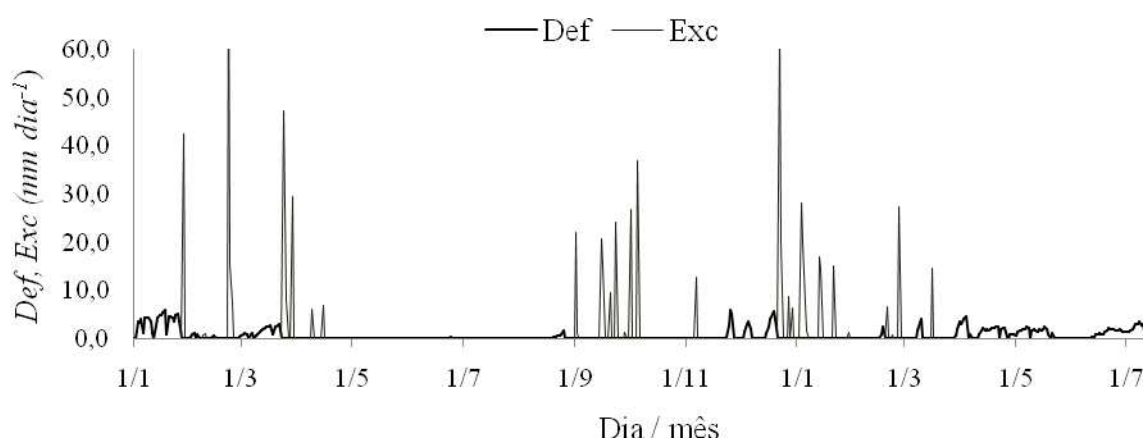


Figura A3.10 – Deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*) para o cultivo da cana-planta, na safra 2006/2007, Paranavaí-PR.

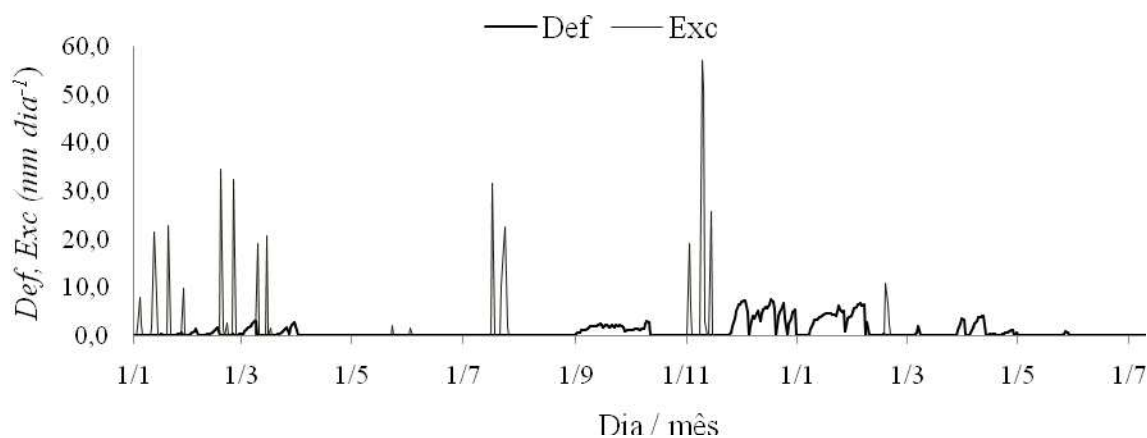


Figura A3.11 – Deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*) para o cultivo da cana-planta, na safra 2007/2008, Paranavaí-PR.

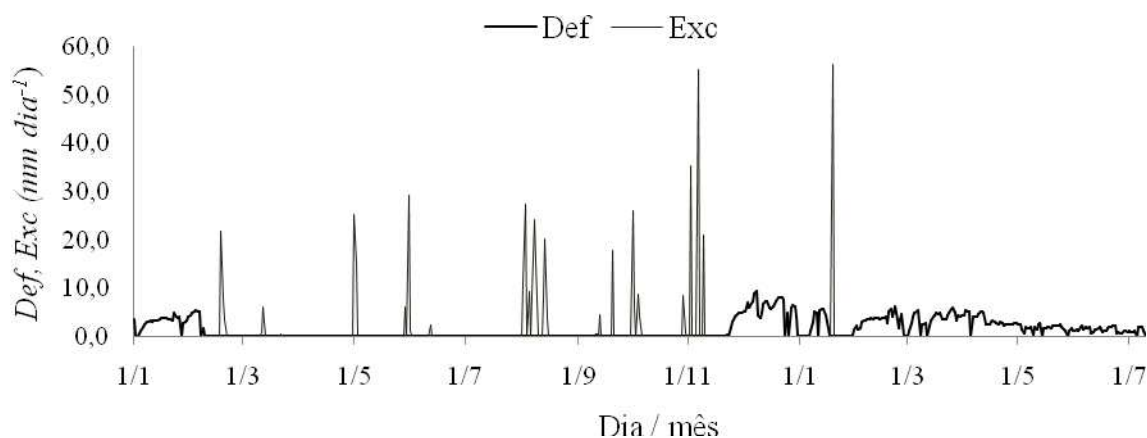


Figura A3.12 – Deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*) para o cultivo da cana-planta, na safra 2008/2009, Paranavaí-PR.

APÊNDICE 4 – Deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*), para o cultivo da cana-soca, nas safras 1997/98 à 2008/09, em Paranavaí-PR.

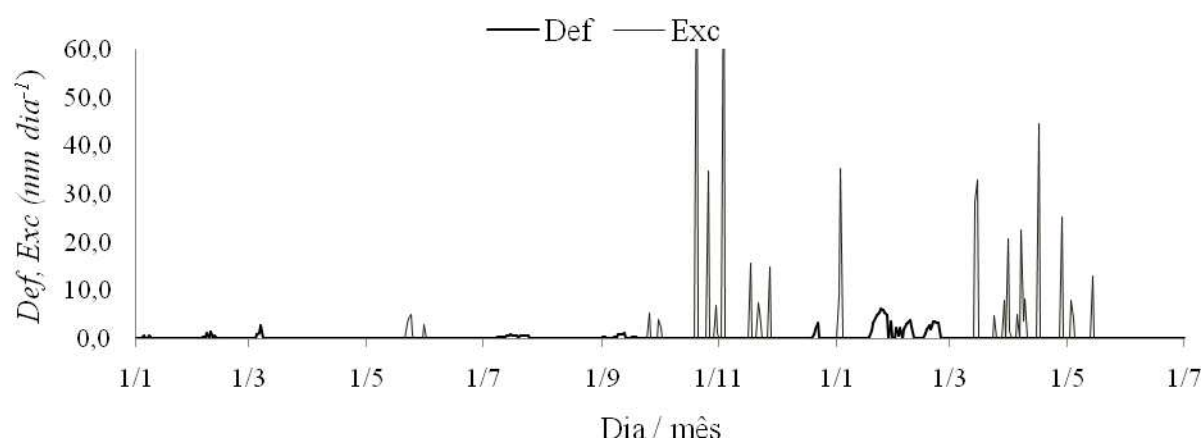


Figura A4.1 – Deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*) para o cultivo da cana-soca, na safra 1997/1998, Paranavaí-PR.

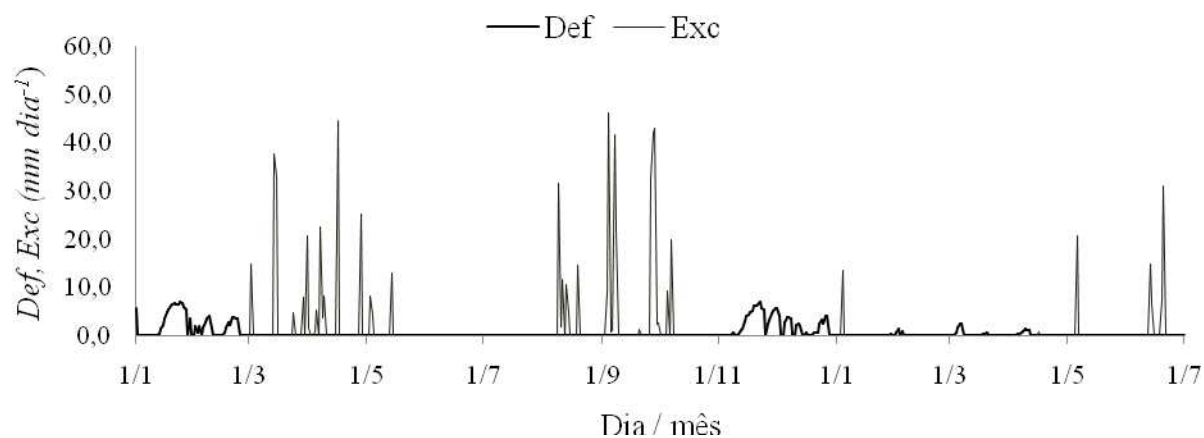


Figura A4.2 – Deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*) para o cultivo da cana-soca, na safra 1998/1999, Paranavaí-PR.

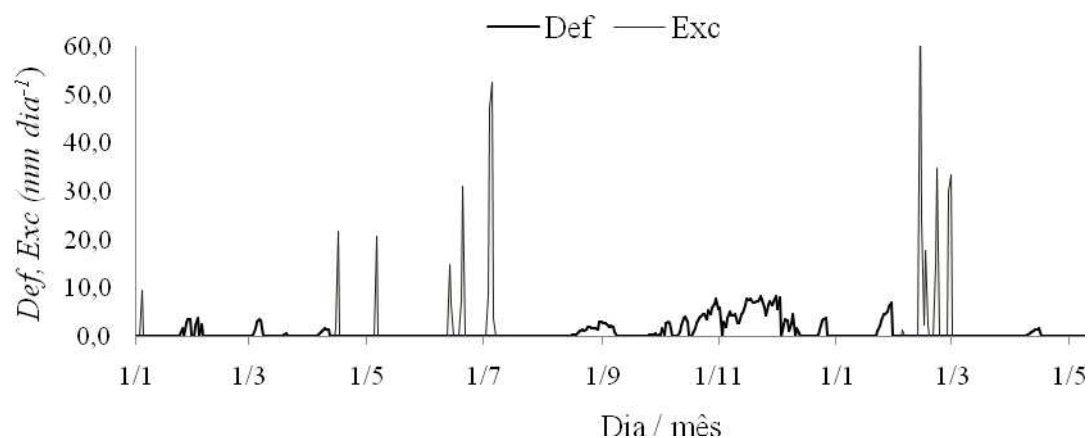


Figura A4.3 – Deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*) para o cultivo da cana-soca, na safra 1999/2000, Paranavaí-PR.

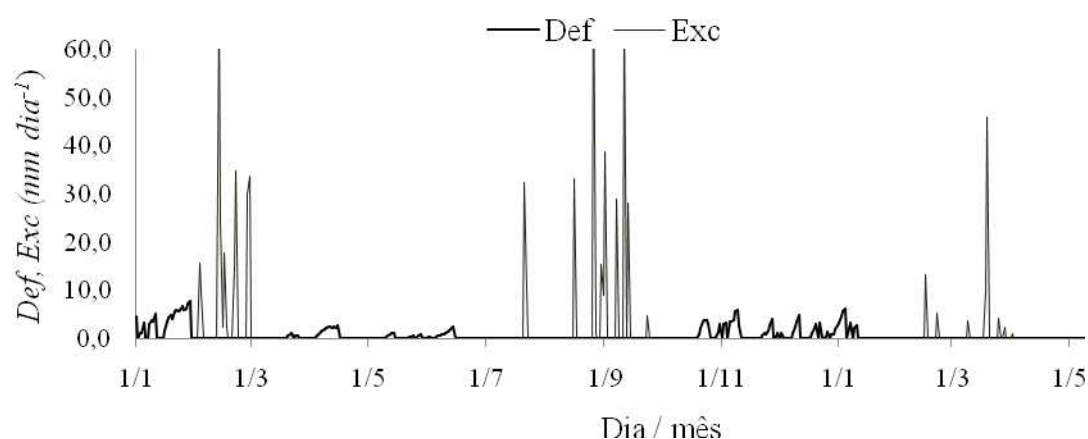


Figura A4.4 – Deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*) para o cultivo da cana-soca, na safra 2000/2001, Paranavaí-PR.

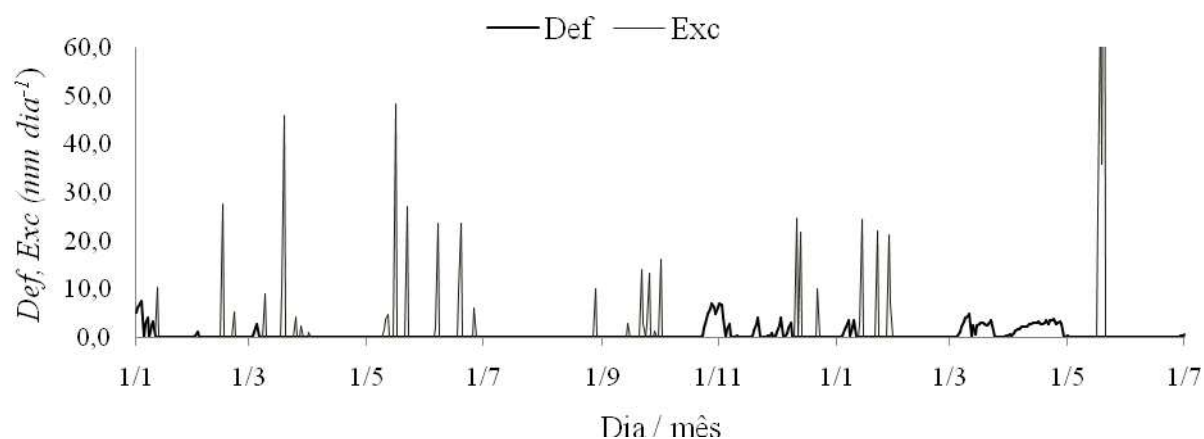


Figura A4.5 – Deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*) para o cultivo da cana-soca, na safra 2001/2002, Paranavaí-PR.

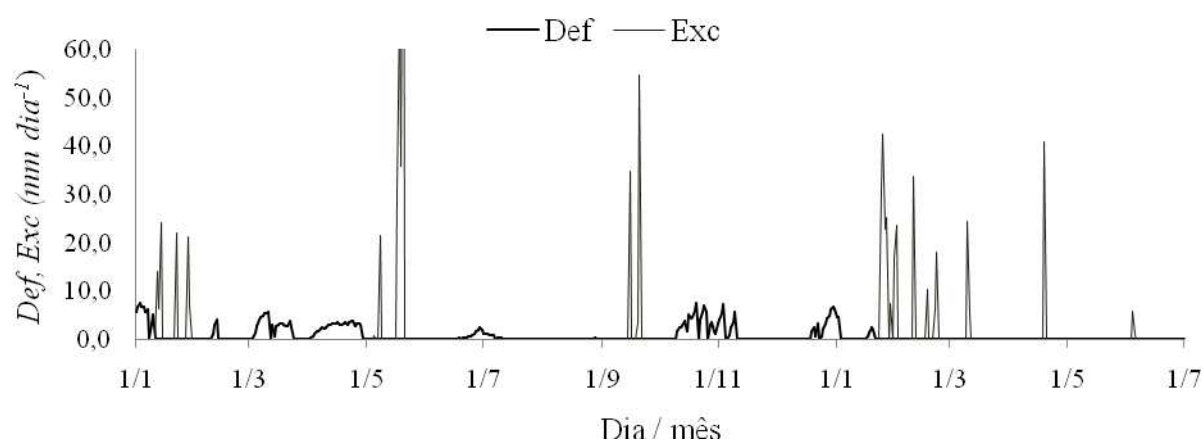


Figura A4.6 – Deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*) para o cultivo da cana-soca, na safra 2002/2003, Paranavaí-PR.

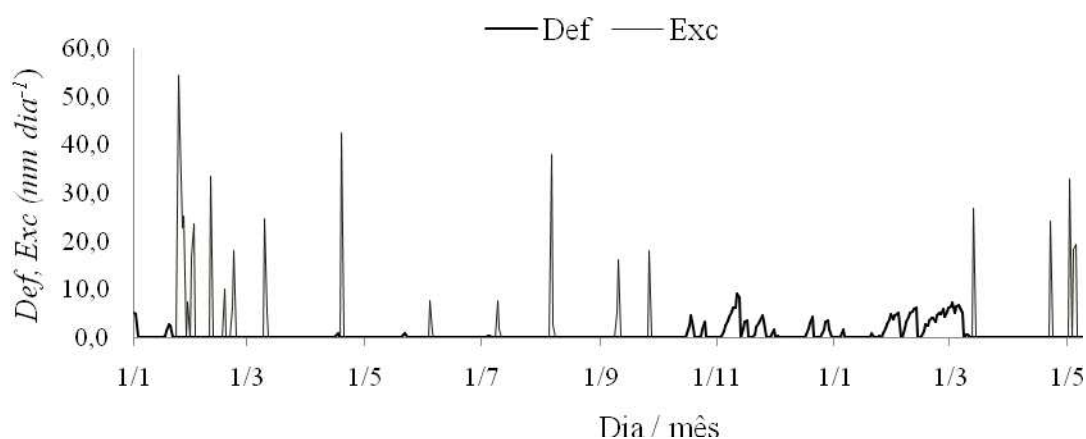


Figura A4.7 – Deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*) para o cultivo da cana-soca, na safra 2003/2004, Paranavaí-PR.

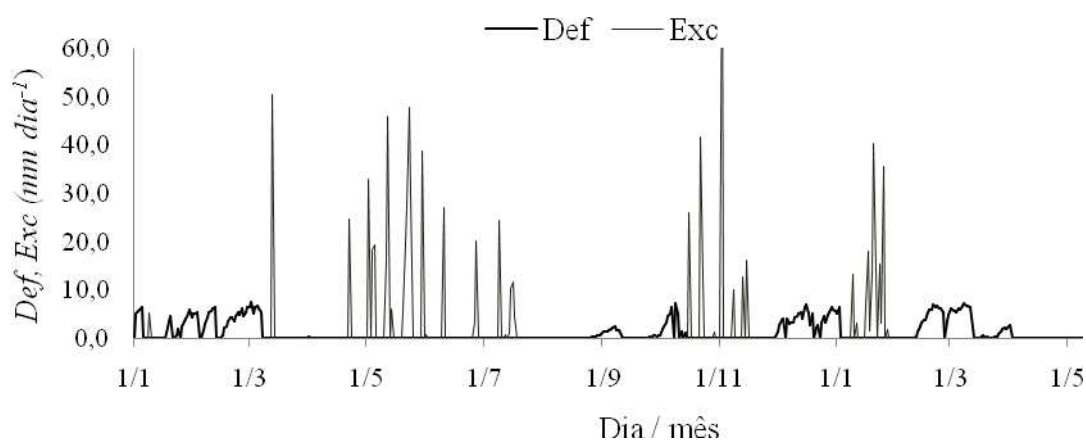


Figura A4.8 – Deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*) para o cultivo da cana-soca, na safra 2004/2005, Paranavaí-PR.

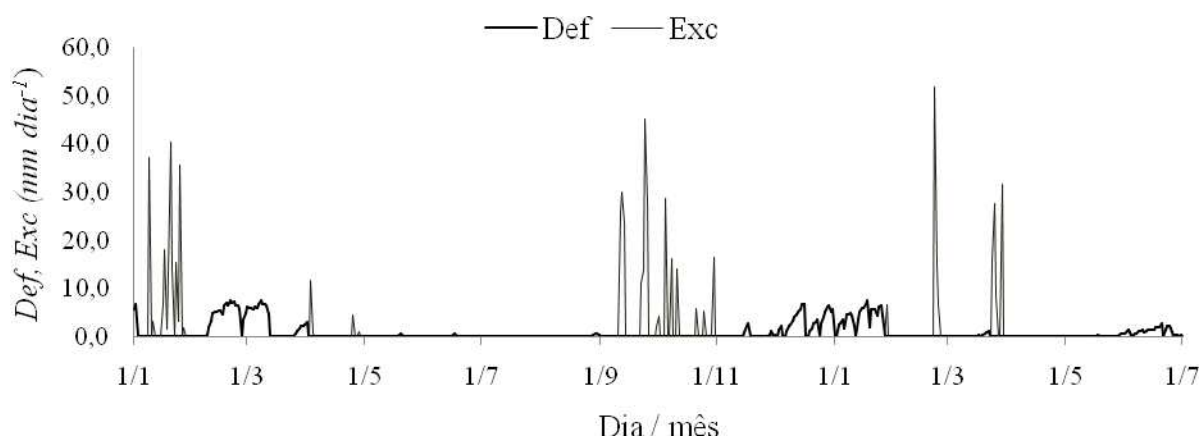


Figura A4.9 – Deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*) para o cultivo da cana-soca, na safra 2005/2006, Paranavaí-PR.

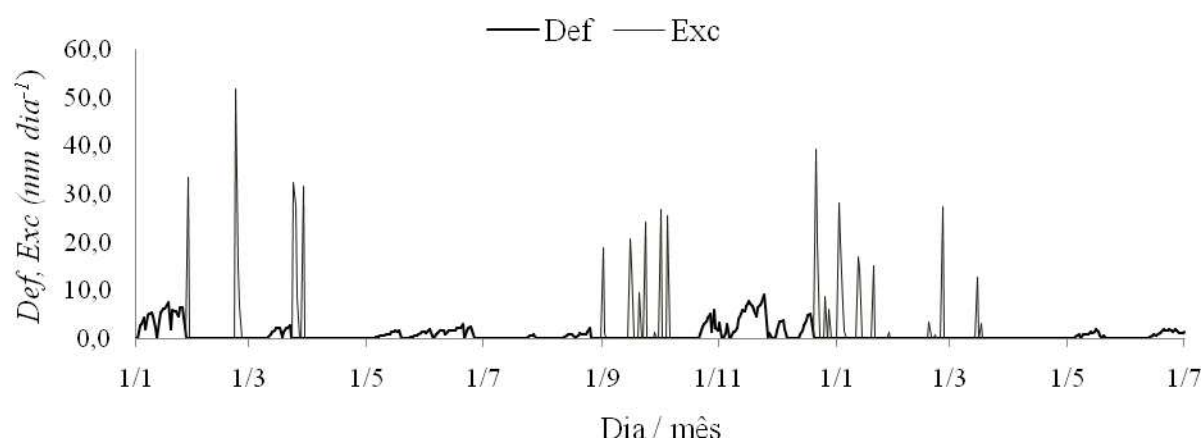


Figura A4.10 – Deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*) para o cultivo da cana-soca, na safra 2006/2007, Paranavaí-PR.

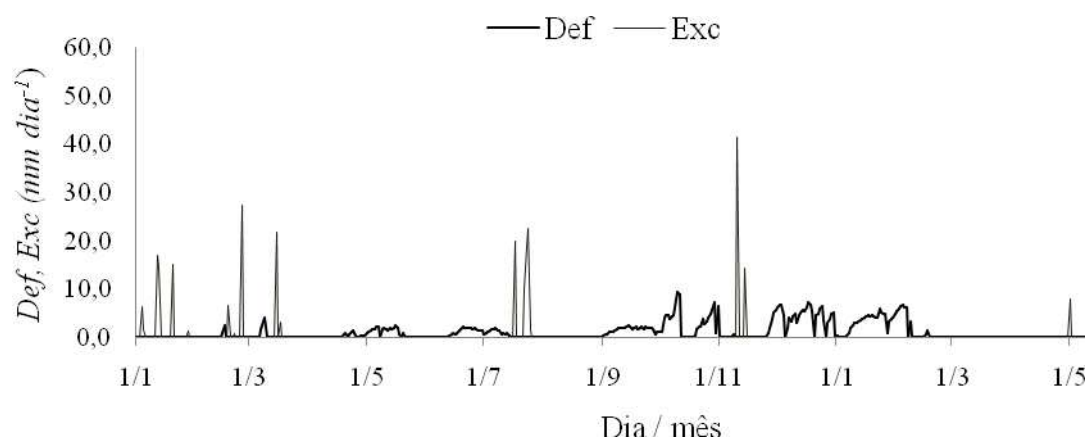


Figura A4.11 – Deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*) para o cultivo da cana-soca, na safra 2007/2008, Paranavaí-PR.

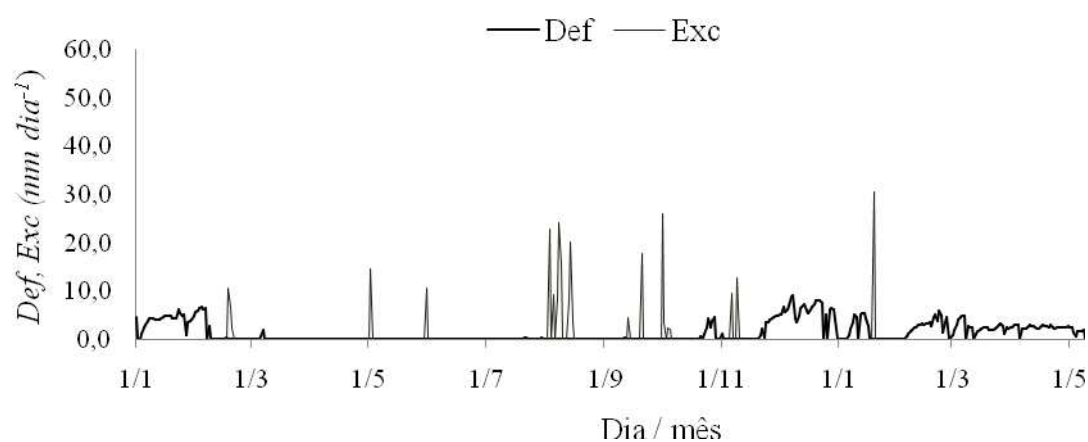
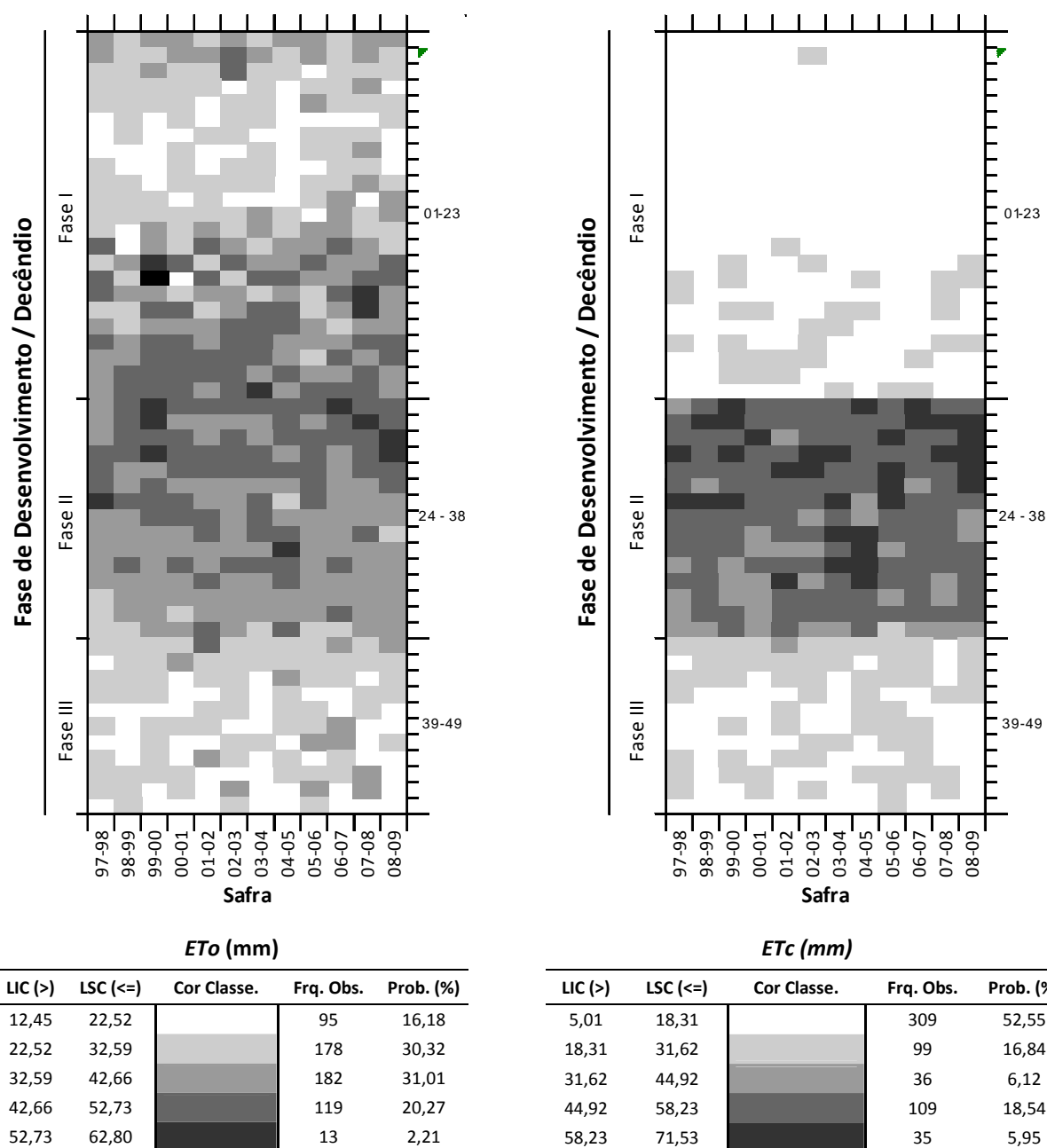


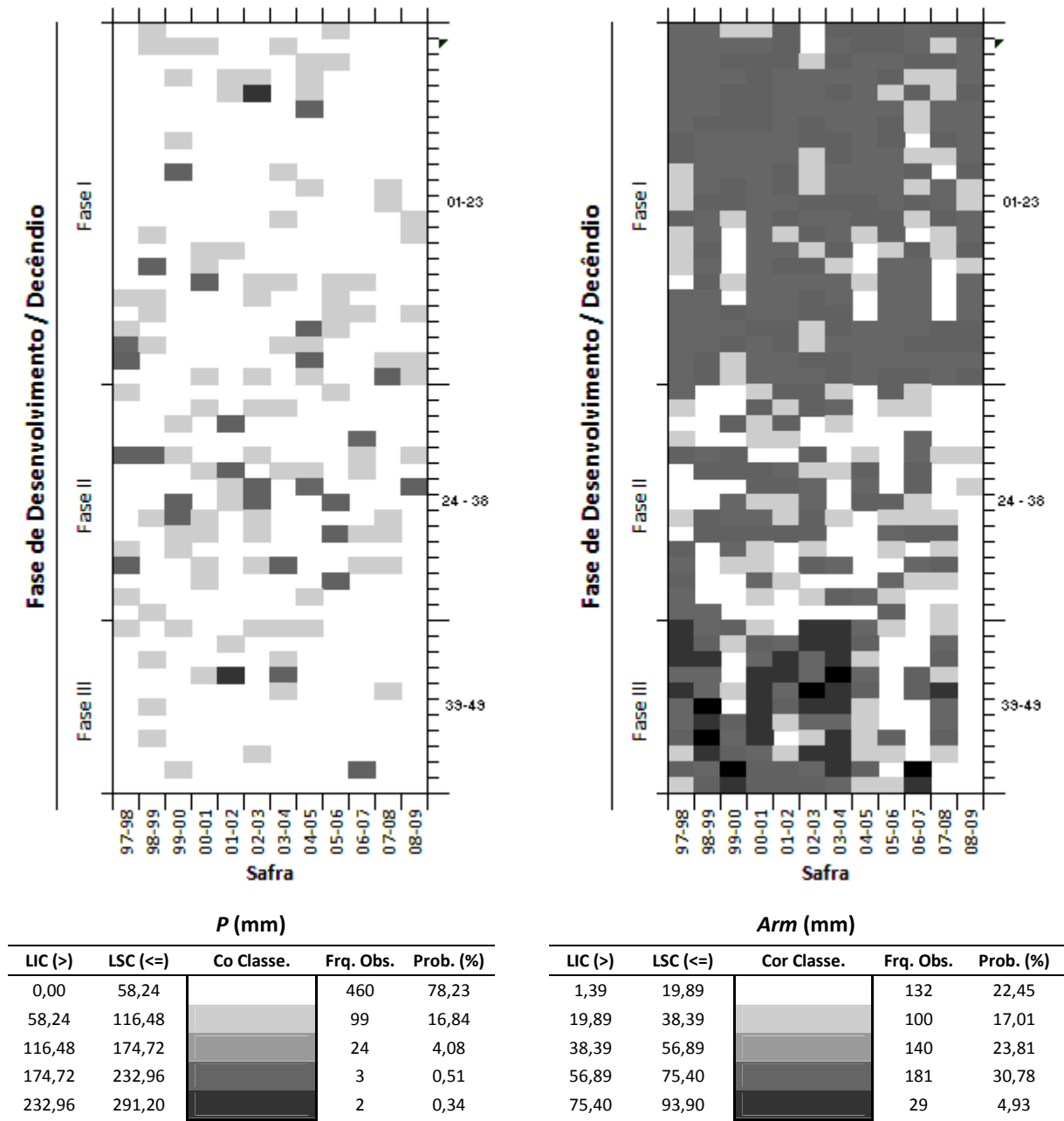
Figura A4.12 – Deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*) para o cultivo da cana-soca, na safra 2008/2009, Paranavaí-PR.

APÊNDICE 5 – Distribuição de frequência das componentes decendiais do balanço hídrico, para a cultura da cana-planta, nas safras 1997/98 à 2008/09, em Paranavaí-PR.



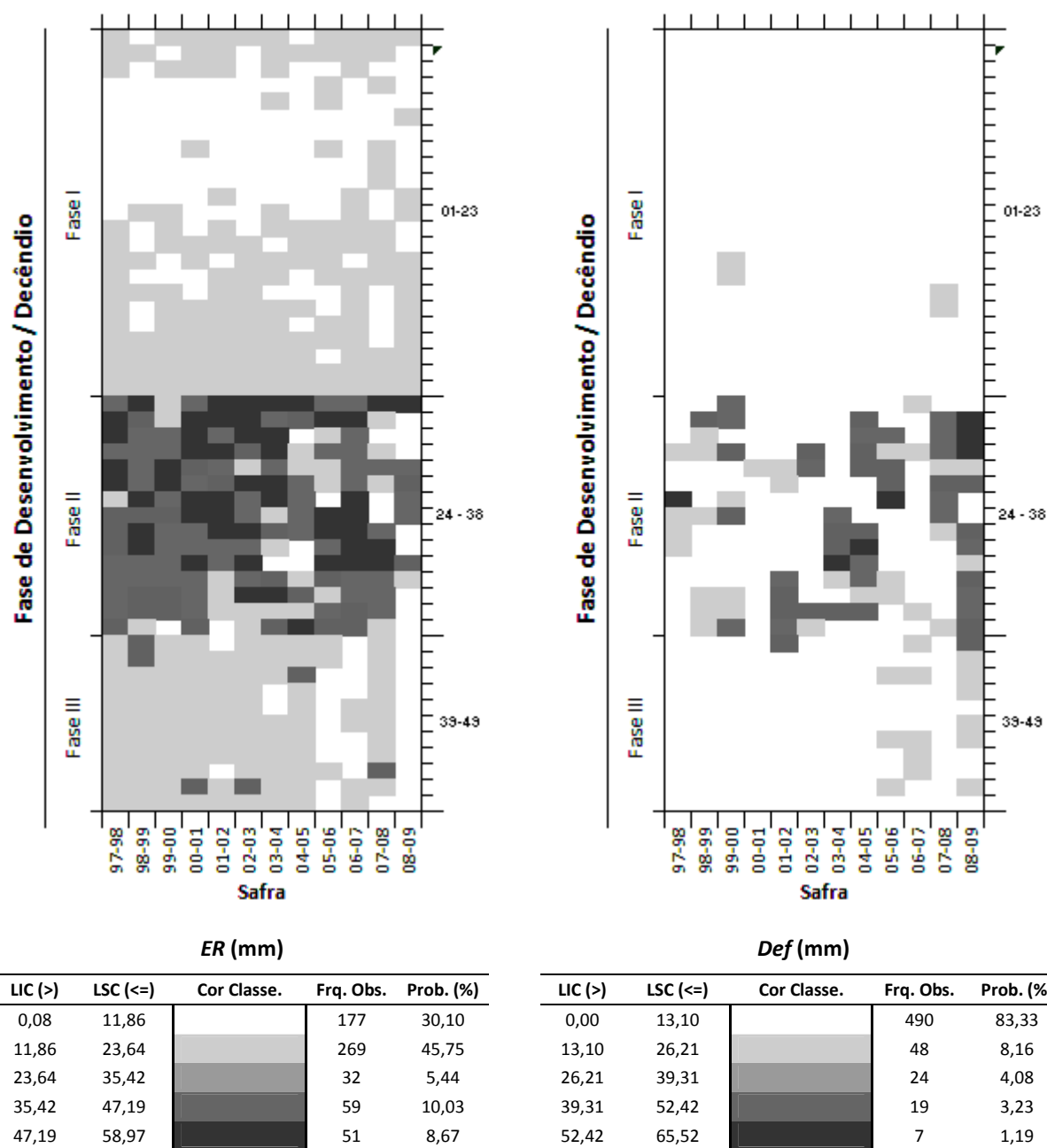
Sendo: LIC – limite inferior da classe; LSC – limite superior da classe; Cor Classe – cor da classe apresentada no diagrama de distribuição de frequência em cores; Frq. Obs. – frequência observada em cada classe; Prob. (%) – probabilidade observada encontrada para cada classe (%).

Figura A5.1 – Distribuição de frequência dos valores decendiais da evapotranspiração de referência (*ETo*) e evapotranspiração da cultura (*ETc*), para cultura da cana-planta, nas safras 1997/98 à 2008/09, em Paranavaí-PR.



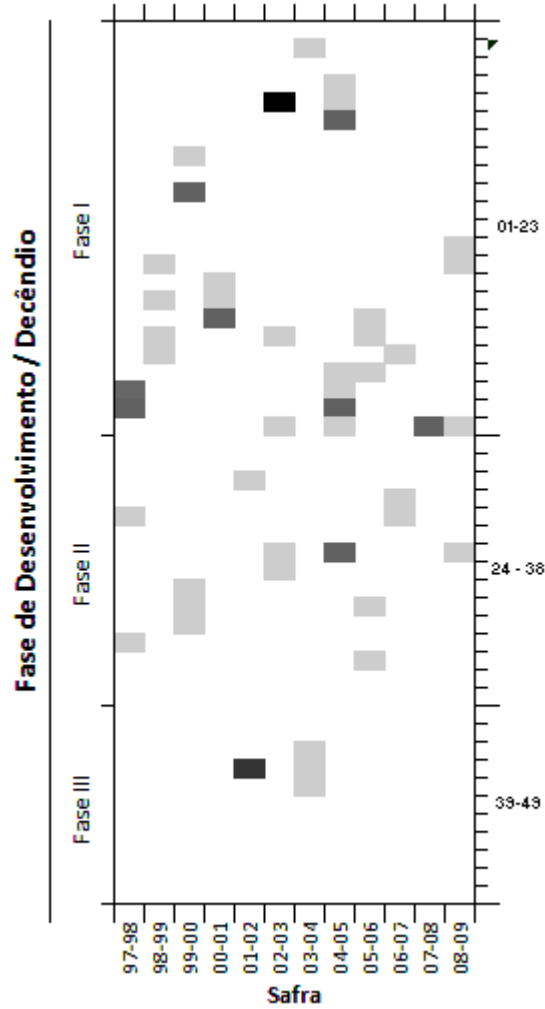
Sendo: LIC – limite inferior da classe; LSC – limite superior da classe; Cor Classe – cor da classe apresentada no diagrama de distribuição de frequência em cores; Frq. Obs. – frequência observada em cada classe; Prob. (%) – probabilidade observada encontrada para cada classe (%).

Figura A5.2 – Distribuição de frequência dos valores decendiais da precipitação (*P*) e armazenamento (*Arm*), para cultura da cana-planta, nas safras 1997/98 à 2008/09, em Paranavaí-PR.



Sendo: LIC – limite inferior da classe; LSC – limite superior da classe; Cor Classe – cor da classe apresentada no diagrama de distribuição de frequência em cores; Frq. Obs. – frequência observada em cada classe; Prob. (%) – probabilidade observada encontrada para cada classe (%).

Figura A5.3 – Distribuição de frequência dos valores decenciais da evapotranspiração real (ER) e deficiência (Def), para cultura da cana-planta, nas safras 1997/98 à 2008/09, em Paranavai-PR.



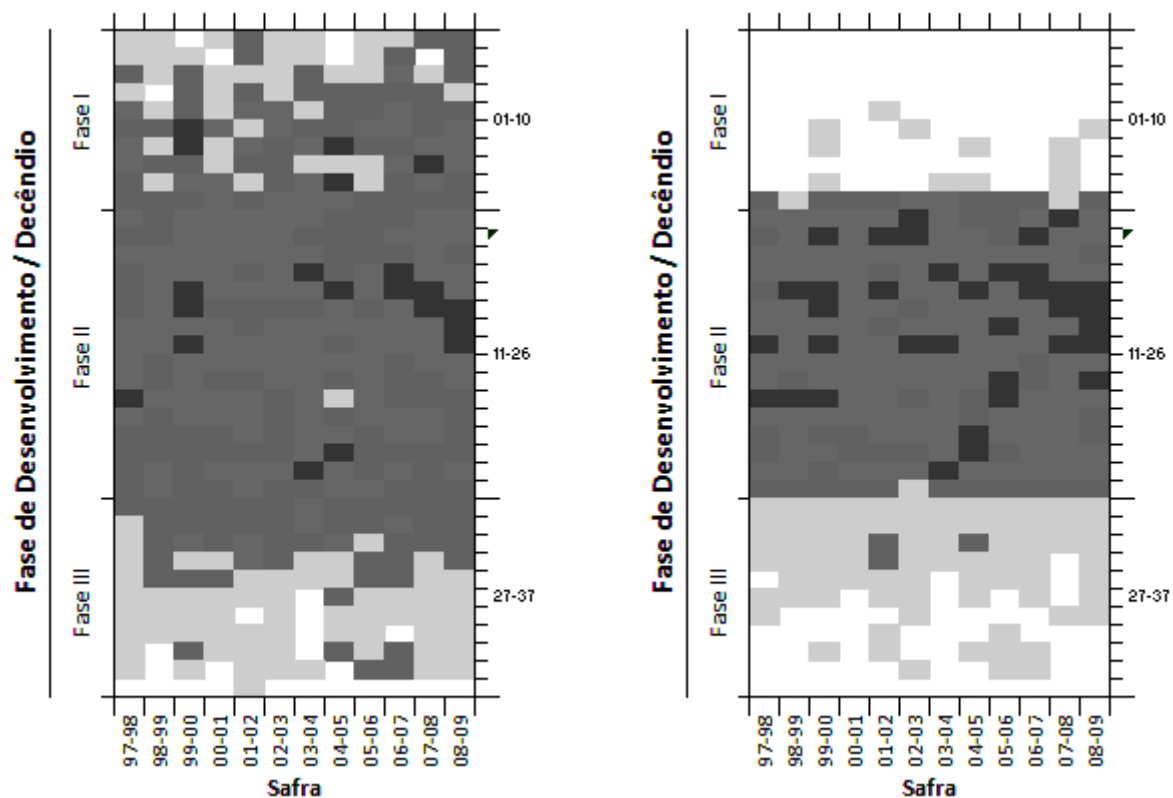
Exc (mm)

LIC (>)	LSC (<=)	Cor Classe.	Frq. Obs.	Prob. (%)
0,00	56,05		540	91,84
56,05	112,11		38	6,46
112,11	168,16		7	1,19
168,16	224,22		1	0,17
224,22	280,27		1	0,17

Sendo: LIC – limite inferior da classe; LSC – limite superior da classe; Cor Classe – cor da classe apresentada no diagrama de distribuição de frequência em cores; Frq. Obs. – frequência observada em cada classe; Prob. (%) – probabilidade observada encontrada para cada classe (%).

Figura A5.4 – Distribuição de frequência dos valores decendiais de excedente (*Exc*), para cultura da cana-planta, nas safras 1997/98 à 2008/09, em Paranaíba-PR.

APÊNDICE 6 – Distribuição de frequência das componentes decendiais do balanço hídrico, para a cultura da cana-soca, nas safras 1997/98 à 2008/09, em Paranavaí-PR.



***ETo* (mm)**

LIC (>)	LSC (<=)	Cor Classe.	Frq. Obs.	Prob. (%)
8,62	19,38		27	6,08
19,38	30,14		99	22,30
30,14	40,90		159	35,81
40,90	51,66		139	31,31
51,66	62,42		20	4,50

***ETc* (mm)**

LIC (>)	LSC (<=)	Cor Classe.	Frq. Obs.	Prob. (%)
5,27	18,94		150	33,78
18,94	32,61		90	20,27
32,61	46,28		48	10,81
46,28	59,95		120	27,03
59,95	73,63		36	8,11

Sendo: LIC – limite inferior da classe; LSC – limite superior da classe; Cor Classe – cor da classe apresentada no diagrama de distribuição de frequência em cores; Frq. Obs. – frequência observada em cada classe; Prob. (%) – probabilidade observada encontrada para cada classe (%).

Figura A6.1 – Distribuição de frequência dos valores decendiais da evapotranspiração de referência (*ETo*) e evapotranspiração da cultura (*ETc*), para cultura da cana-soca, nas safras 1997/98 à 2008/09, em Paranavaí-PR.

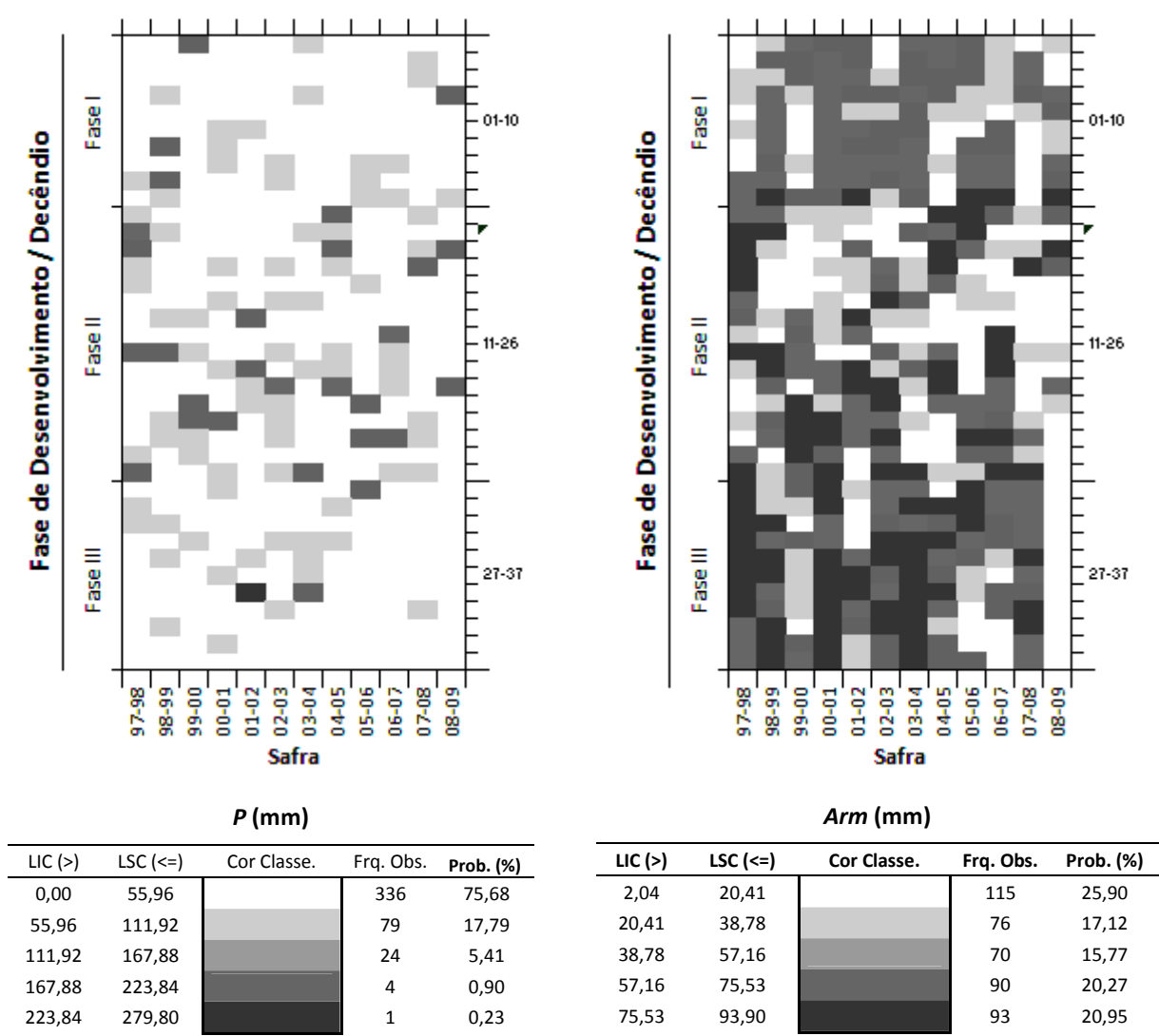
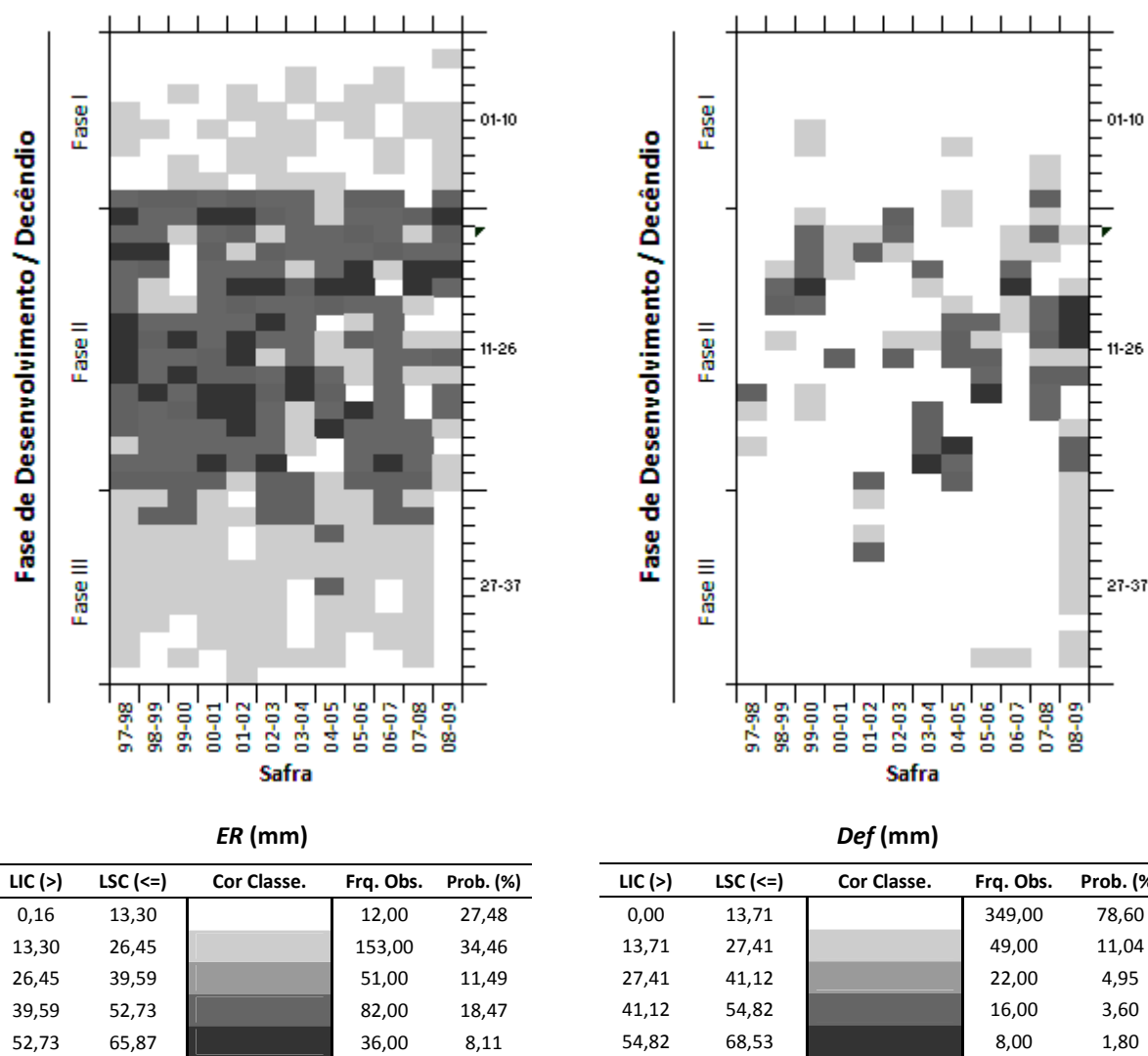
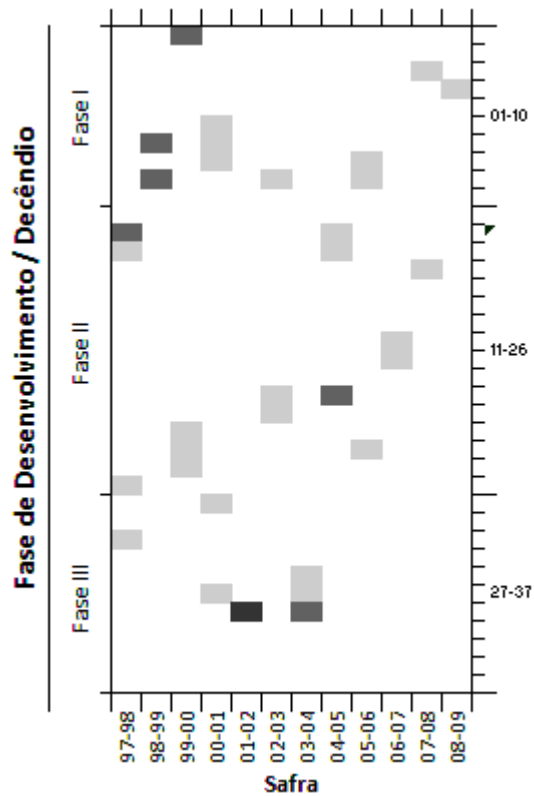


Figura A6.2 – Distribuição de frequência dos valores decenciais da precipitação (*P*) e armazenamento (*Arm*), para cultura da cana-soca, nas safras 1997/98 à 2008/09, em Paranavaí-PR.



Sendo: LIC – limite inferior da classe; LSC – limite superior da classe; Cor Classe – cor da classe apresentada no diagrama de distribuição de frequência em cores; Frq. Obs. – frequência observada em cada classe; Prob. (%) – probabilidade observada encontrada para cada classe (%).

Figura A6.3 – Distribuição de frequência dos valores decendiais da evapotranspiração real (ER) e deficiência (Def), para cultura da cana-soca, nas safras 1997/98 à 2008/09, em Paranaíba-PR.



Exc (mm)

LIC (>)	LSC (<=)	Cor Classe.	Frq. Obs.	Prob. (%)
0,00	53,4		411,0	92,57
53,34	106,68		26,00	5,86
106,68	160,02		6,00	1,35
160,02	213,37		0,00	0,00
213,37	266,71		1,00	0,23

Sendo: LIC – limite inferior da classe; LSC – limite superior da classe; Cor Classe – cor da classe apresentada no diagrama de distribuição de frequência em cores; Frq. Obs. – frequência observada em cada classe; Prob. (%) – probabilidade observada encontrada para cada classe (%).

Figura A6.4 – Distribuição de frequência dos valores decendiais de excedente (*Exc*), para cultura da cana-soca, nas safras 1997/98 à 2008/09, em Paranavaí-PR.

APÊNDICE 7 – Parâmetros estatísticos para as componentes do balanço hídrico, no cultivo da cana-planta e cana-soca, nas safras 1997/98 à 2008/09, em Paranavaí-PR.

Tabela A7.1. Parâmetros estatísticos, distribuição de probabilidade de melhor ajuste e probabilidade de ocorrência das componentes do balanço hídrico, nos cultivo da cana-planta e cana-soca, nas safras entre 1997 e 2009, em Paranavaí-PR

Parâmetro	Menor Valor	Maior Valor	Média	Des. Padrão	Moda	Parâmetros		Dmax Tab. 5%	Dmax Calculado	Melhor Distribuição	Probabilidade valor 0 (%)	Prob. a 75% (mm)
						<i>Alfa</i>	<i>Beta</i>					
Ciclo cana-planta												
<i>ETo</i>	12,4	62,8	33,9	10,2	40,1	10,3	3,3	0,0957	0,0343	G	0,0	40,4
<i>ETc</i>	5,0	71,5	26,1	17,8	15,0	2,4	10,8	0,0565	-	-	0,0	-
<i>P</i>	1,0	291,2	45,0	38,9	15,5	1,2	37,7	0,0639	0,0162	G	21,7	3,0
<i>Arm</i>	1,4	93,9	43,5	23,8	61,5	2,0	22,1	0,0568	-	-	1,0	-
<i>ER</i>	1,2	59,0	20,4	14,0	15,6	2,4	8,5	0,0568	-	-	1,2	-
<i>Def</i>	1,1	65,5	19,1	15,5	4,3	1,3	14,1	0,1007	0,0357	G	68,4	5,6
<i>Exc</i>	1,1	280,3	40,3	39,2	15,1	1,2	33,2	0,0957	0,0343	G	65,0	15,6
Ciclo cana-soca												
<i>ETc</i>	5,3	73,6	33,5	19,1	15,5	2,8	12,1	0,0650	-	-	0,0	-
<i>P</i>	1,0	279,8	46,5	39,9	14,9	1,1	40,9	0,0723	0,0104	G	19,1	4,2
<i>Arm</i>	2,0	93,9	47,7	29,3	6,6	2,3	20,9	0,0661	-	-	0,0	-
<i>ER</i>	1,0	65,9	26,0	16,3	10,8	2,2	11,6	0,0653	-	-	0,9	-
<i>Def</i>	1,1	68,5	19,8	15,7	4,5	1,3	15,3	0,1036	0,0330	G	60,4	10,7
<i>Exc</i>	1,3	266,7	41,8	38,2	14,5	1,3	31,3	0,1267	0,0099	G	73,5	4,1

APÊNDICE 8 – Parâmetros estatísticos para as componentes do balanço hídrico, considerando as fases de desenvolvimento da cultura da cana-planta e cana-soca, nas safras 1997/98 à 2008/09, em Paranavaí-PR.

Tabela A8.1. Parâmetros estatísticos das componentes do balanço hídrico (*ETo*, *ETc*, *P*, *Arm*, *ER*, *Def* e *Exc*), considerando as fases de desenvolvimento da cultura da **cana-planta**, nas safras 1997/98 à 2008/09, em Paranavaí-PR.

Fase	Menor Valor	Maior Valor	Média	Des. Padrão	Moda	Parâmetros		Dmax Tab. 5%	Dmax Calculado	Melhor Distribuição	Probabilidade valor 0 (%)	Prob. a 75% (mm)
						<i>Alfa</i>	<i>Beta</i>					
Evapotranspiração de referência (<i>ETo</i>)												
I	12,5	62,8	33,1	10,0	30,1	10,5	3,1	0,0825	0,0419	N	0,0	39,8
II	26,6	59,4	41,6	6,4	41,4	44,1	0,9	0,1021	0,0119	G	0,0	43,5
III	12,4	46,9	25,1	5,8	21,1	17,7	1,4	0,1192	0,0344	G	0,0	28,5
Evapotranspiração da cultura (<i>ETc</i>)												
I	5,0	25,1	13,2	4,0	12,0	10,5	1,3	0,0825	0,0419	N	0,0	15,9
II	30,2	71,5	51,3	7,9	48,8	43,0	1,2	0,1021	0,0180	G	0,0	56,7
III	9,3	35,2	18,8	4,3	15,8	17,7	1,1	0,1192	0,0344	G	0,0	22,4
Precipitação (<i>P</i>)												
I	1,2	291,2	42,0	38,6	15,7	1,2	34,3	0,0948	0,0255	G	24,2	0,8
II	1,0	199,4	50,0	41,4	10,9	1,3	38,2	0,1080	0,0293	G	10,5	12,1
III	1,0	279,8	37,9	38,2	14,9	0,9	39,1	0,1444	0,0320	G	31,6	0,0
Armazenamento da água no solo (<i>Arm</i>)												
I	2,6	65,3	50,3	15,8	62,2	5,6	9,0	0,0825	-	-	0,0	-
II	1,5	68,1	28,0	20,8	4,8	1,3	21,5	0,1021	0,0862	G	0,0	38,5
III	1,4	93,9	46,2	29,3	6,0	1,8	27,5	0,1220	0,0746	U	4,5	21,3

Tabela A8.1. Parâmetros estatísticos das componentes do balanço hídrico (*ETo*, *ETc*, *P*, *Arm*, *ER*, *Def* e *Exc*), considerando as fases de desenvolvimento da cultura da **cana-planta**, nas safras 1997/98 à 2008/09, em Paranavaí-PR.

Fase	Menor Valor	Maior Valor	Média	Des. Padrão	Moda	Parâmetros		Dmax Tab. 5%	Dmax Calculado	Melhor Distribuição	Probabilidade valor 0 (%)	Prob. a 75% (mm)
						<i>Alfa</i>	<i>Beta</i>					
Evapotranspiração real (<i>ER</i>)												
I	1,4	23,1	12,6	3,9	11,2	9,2	1,4	0,0826	0,0299	G	0,4	14,5
II	2,2	59,0	35,9	15,3	49,5	3,0	12,0	0,1021	0,0833	T	0,0	47,1
III	1,2	27,3	15,2	5,6	15,6	4,2	3,6	0,1220	0,0633	N	4,5	18,8
Deficiência hídrica (<i>Def</i>)												
I	1,1	22,8	8,5	6,8	2,7	1,4	6,1	0,2990	0,0663	G	92,1	0,0
II	1,1	65,5	24,9	16,9	4,3	1,6	15,2	0,1300	0,0507	G	38,1	23,9
III	1,3	34,5	10,4	7,1	3,1	2,0	5,2	0,1882	0,0520	G	59,4	6,9
Excedente hídrico (<i>Exc</i>)												
I	1,5	280,3	41,2	39,7	15,4	1,2	34,7	0,1225	0,0468	G	54,5	27,1
II	1,3	148,5	37,4	29,3	9,5	1,4	26,1	0,1864	0,0307	G	69,6	10,4
III	1,1	262,8	41,4	47,5	19,8	1,0	40,7	0,2687	0,0867	E	79,7	0,0

Tabela A8.2. Parâmetros estatísticos das componentes do balanço hídrico (*ETo*, *ETc*, *P*, *Arm*, *ER*, *Def* e *Exc*), considerando as fases de desenvolvimento da cultura da **cana-soca**, nas safras 1997/98 à 2008/09, em Paranavaí-PR.

Fase	Menor Valor	Maior Valor	Média	Des. Padrão	Moda	Parâmetros		Dmax Tab. 5%	Dmax Calculado	Melhor Distribuição	Probabilidade valor 0 (%)	Prob. a 75% (mm)
						<i>Alfa</i>	<i>Beta</i>					
Evapotranspiração de referência (<i>ETo</i>)												
I	13,2	62,4	34,7	9,9	35,3	12,2	2,8	0,1251	0,0367	G	0,0	40,2
II	28,1	58,9	43,1	5,8	45,1	53,6	0,8	0,0989	0,0217	N	0,0	47,0
III	8,6	46,1	27,3	8,4	33,0	9,2	3,0	0,1192	0,0373	N	0,0	33,0
Evapotranspiração da cultura (<i>ETc</i>)												
I	5,3	50,5	16,3	8,9	12,0	4,8	3,4	0,1251	0,1157	G	0,0	20,5
II	31,4	73,6	53,1	8,4	54,6	39,4	1,4	0,0989	0,0310	N	0,0	58,8
III	6,5	34,6	20,5	6,3	24,8	9,2	2,2	0,1192	0,0373	N	0,0	24,7
Precipitação (<i>P</i>)												
I	1,2	140,4	41,9	34,6	8,2	1,3	32,4	0,1513	0,0304	G	31,4	0,0
II	1,0	197,6	52,8	43,9	10,8	1,2	43,2	0,1030	0,0165	G	7,8	13,2
III	1,0	279,8	36,4	36,3	14,9	0,9	37,2	0,1370	0,0220	G	24,1	0,3
Armazenamento da água no solo (<i>Arm</i>)												
I	3,1	93,9	43,1	21,8	62,1	2,8	15,4	0,1256	0,0978	N	0,8	57,7
II	2,4	93,9	42,8	28,6	7,0	2,0	21,9	0,1010	0,0909	E	4,1	57,5
III	2,0	93,9	55,0	29,1	89,3	3,0	20,0	0,1220	0,0909	N	4,5	73,6

Tabela A8.2. Parâmetros estatísticos das componentes do balanço hídrico (ET_o , ET_c , P , Arm , ER , Def e Exc), considerando as fases de desenvolvimento da cultura da **cana-soca**, nas safras 1997/98 à 2008/09, em Paranavaí-PR.

Fase	Menor Valor	Maior Valor	Média	Des. Padrão	Moda	Parâmetros		Dmax Tab. 5%	Dmax Calculado	Melhor Distribuição	Probabilidade valor 0 (%)	Prob. a 75% (mm)
						<i>Alfa</i>	<i>Beta</i>					
Evapotranspiração real (ER)												
I	1,0	50,5	14,2	8,7	13,4	3,2	4,4	0,1251	0,0991	G	0,0	18,3
II	3,4	65,9	38,9	14,6	48,5	4,2	9,2	0,0989	0,0493	T	0,0	49,4
III	1,1	33,3	17,8	7,2	22,0	3,7	4,8	0,1211	0,0480	N	3,0	22,5
Deficiência hídrica (Def)												
I	1,1	31,2	8,4	8,5	3,2	1,1	7,5	0,2544	0,0908	E	75,2	0,0
II	1,4	68,5	25,1	16,8	18,2	1,8	13,9	0,1312	0,0569	G	43,0	23,2
III	1,2	32,2	11,9	8,5	3,2	1,4	8,0	0,2252	0,0645	G	71,4	2,4
Excedente hídrico (Exc)												
I	2,9	120,2	43,3	33,5	39,5	1,5	28,2	0,2166	0,0738	G	66,1	17,8
II	1,3	141,5	39,4	33,6	10,0	1,3	31,4	0,1977	0,0558	E	74,6	0,6
III	3,5	266,7	43,1	47,8	22,3	1,3	34,6	0,2544	0,1090	E	77,4	0,0

